Reinhard Breuer
Chefredakteur

Wenn die Gier unwiderstehlich wird

Was trifft zu: Fördert Alkohol die Gesundheit, wenn er in kleinen Mengen genossen wird, und ist er nur bei echten Dauertrinkern ein Problem? Oder muss auch schon ein geringer regelmäßiger Alkoholgenuss als Gefahr eingestuft werden?

Von der Antwort hängt viel ab: Kann man sich beim Gläschen Bier oder Wein entspannt zurücklehnen und sollte lediglich etwas Maß halten? Oder soll die legale Sozialdroge Alkohol generell bekämpft, ihr Konsum gar verboten werden? Den Aufschrei einer ganzen Wirtschaftsbranche, die in Deutschland jährlich – seit 1999 leicht sinkend – etwa 18 Milliarden Euro umsetzt und dem Staat rund 3,5 Milliarden Euro an Alkoholsteuer in die Kassen spült, kann man sich sogleich ausmalen und damit diesen Gedanken fallen lassen. Die Schwelle zur Sucht ist niedrig, auch rein geselliges Trinken kann Gefährdete in fatale Abhängigkeit führen. Dort finden sich Patienten und Schicksale, deren Kosten letztlich wir alle tragen:

Kranke und Tote: Schwerer Alkoholmissbrauch oder sogar akute Abhängigkeit liegt bundesweit bei 4,2 Millionen Menschen vor. Davon sterben pro Jahr rund 42 000 Menschen; zusätzlich 1500 Personen bei Verkehrsunfällen mit Alkoholeinfluss. Leichter Alkoholgenuss steigert die Gefahr für Krankheiten wie Krebs oder Leberschäden. **Angehörige:** Etwa 3 bis 5 Millionen Menschen werden als Angehörige von Alkoholkranken in Mitleidenschaft gezogen. Häufig unterstützen sie noch die hoch entwickelte Kunst dieser Patienten zur Verschleierung und Verdrängung ihres Problems – und bezahlen dies mit sozialer Zerrüttung und Isolierung. **Kosten:** Alkoholbezogene Krankheiten belasten unser Gesundheitssystem jährlich mit rund 20 Milliarden Euro. 92 000 Fälle von Arbeitsunfähigkeit und Invalidität werden pro Jahr registriert, 6500 Menschen jährlich gehen deswegen vorzeitig in Rente. Diese Kosten tragen per Gesundheits- und Rentensteuer alle – ein Minusposten für den »Wirtschaftsfaktor Alkohol«.

THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; QUELLE: STEPHAN TEYSSEN

Als wir vor zwei Jahren Manfred Singers und Stephan Teyssens Artikel über »Das unterschätzte Gift« publizierten (April 2001, S. 58), da erreichten uns Proteste, die positive Einflüsse auf das Herz-Kreislauf-System bei mäßigem Alkoholgenuss angaben. In dem Artikel auf Seite 62 analysiert nun der amerikanische Kardiologe Arthur L. Klatsky genau, wann sich mäßiger Konsum tatsächlich empfehlen lässt, wann also mit einem Schutzeffekt für Herz und Kreislauf zu rechnen ist.

Die Antwort wird nicht jeden trinkfroh stimmen. In Abhängigkeit von diversen Risikofaktoren erhalten nur wenige Gruppen den Rat, aus gesundheitlichen Gründen (ein wenig) weiterzutrinken. Grundsätzlich gilt, was Singer und Teyssen seinerzeit ihren Kritikern antworteten: »Alkohol ist keine Medizin.« Anerkannt ist längst, dass Alkoholismus eine schwere Krankheit ist und Alkoholiker unheilbar krank sind.

Denn: Es gibt keine wirksame Therapie gegen diese Krankheit. Nach der obligaten Entgiftung in einer Klinik erleiden 95 Prozent der Suchtkranken einen Rückfall, während der sich anschließenden Langzeittherapie greifen dann weitere dreißig bis sechzig Prozent wieder zur Flasche. Medikamente, die den Patienten die krankhaft gesteigerte Gier nach dem Stoff nehmen sollen (wie das Psychopharmakon Campral), haben nur bescheidenen Erfolg.

Das kommt, nach Jahrzehnten von Hirnforschung und Gruppentherapie, einer Ohnmachtserklärung gleich. Dieser Umstand vor allem macht Alkoholismus zur schweren Volkskrankheit – unheilbar und kaum stabilisierbar für den Patienten, fatal für die Gesellschaft, die diese Last mittragen muss.

INHALT

SPEKTROGRAMM

10 Dunkle Energie direkt beobachtet · Junge Nerven gegen Depression · Ionenkanäle fördern Vergesslichkeit · Einflussreiche Ameisenväter · Heiße Brutstätten des Lebens · Ältestes Sonnenobservatorium · Karte des Erdschwerefeldes · Moderne Netzspinnen ziemlich vorgestrig

13 Bild des Monats
Der Hauch der Unterwelt

FORSCHUNG AKTUELL

14 Satellit misst ozeanische Magnetfelder
Magnetische Signale von strömendem Meerwasser erstmals nachgewiesen

16 Lasergetriebene Wasserpistole
Wie sich mit Licht haardünne Flüssigkeitsstrahlen erzeugen lassen

20 Aktive Atmung bei Insekten
Die angeblich starren Tracheen können pulsieren und so als Luftpumpen wirken

22 Troia – Wächter über die Dardanellen
Neue Deutung eines alten Briefs erhellt reale Hintergründe von Homers Ilias

THEMEN

26 25 Jahre Spektrum der Wissenschaft Teil X: Sand und Gele
Statistische Konzepte erklären das kritische Verhalten von Substanzen

32 TITELTHEMA: Evolution der Feder
Schon vor den Vögeln trugen Dinosaurier ein Gefieder

44 Auf den Spuren dunkler Teilchen
Physiker suchen exotische Partikel, deren Existenz Kosmologen vermuten

52 Wie die Zelle Gene mundtot macht
Genetische Botschaften unerwünschten Inhalts wandern in den Reißwolf

62 Alkohol und Herzinfarkt
Offenbar schützt Alkohol vor Koronarerkrankungen

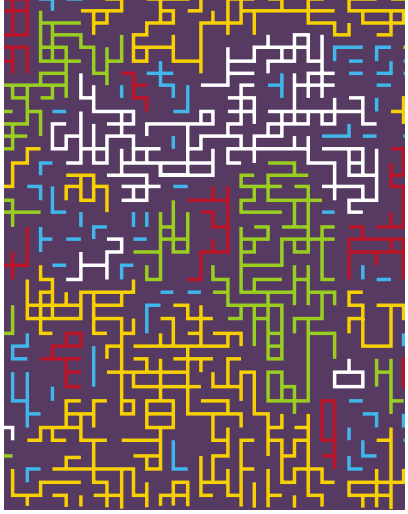
70 Aztekengärten
Üppige Gärten und Parkanlagen gehörten zum Alltag des aztekischen Adels

78 Nanoschichten
Schnellere Chips dank ultradünner Funktionsschichten

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

86 Bessere Früherkennung von Brustkrebs
Die Vorteile der Magnetresonanz-Tomografie

Titelbild: Fossilien beweisen: Viele zweibeinige Dinosaurier besaßen Federn, auch der hier gezeichnete Sinornithosaurus aus China. Das Reptil war etwa hühnergroß. *Bild: Kazuhiko Sano*



SEITE 26

SERIE »25 JAHRE SPEKTRUM« (X)

Mit Zufall und Statistik zum Ziel

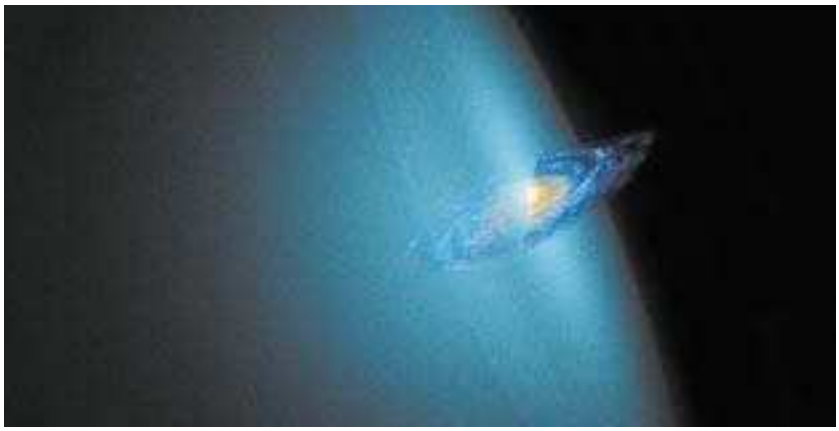
Wenn winzige Störungen auftreten, ändern manche Substanzen schlagartig ihre Eigenschaften. Um dieses Verhalten zu beschreiben, sind neuartige Modelle vonnöten.

SEITE 44

TEILCHENPHYSIK

Die Suche nach Dunkler Materie

Das Weltall ist offenbar von riesigen Mengen unbekannter Teilchen erfüllt, die sich nur durch ihre Schwerkraft bemerkbar machen. Teilchenphysiker in aller Welt versuchen nun, das Wesen der exotischen Partikel zu enträtseln.



SEITE 52

GENETIK

Zensur in der Zelle

Zu ihrer Überraschung entdeckten Biologen, dass Tier- und Pflanzenzellen unerwünschte Gene zum Schweigen bringen können, indem sie deren RNA-Kopien zerschnipseln. Biotechnologiefirmen sind schon dabei, diesen vielseitigen Regulationsmechanismus für medizinische Zwecke zu nutzen.

SEITE 62

MEDIZIN

Alkohol fürs Herz

Das tägliche Glas Wein scheint vor Herzinfarkt zu schützen – allerdings nur bei speziellen Indikationen: Bevor man es sich verordnet, sollte man die Risiken abwägen.

TITELTHEMA: EVOLUTION

Zuerst kam die Feder

SEITE 32

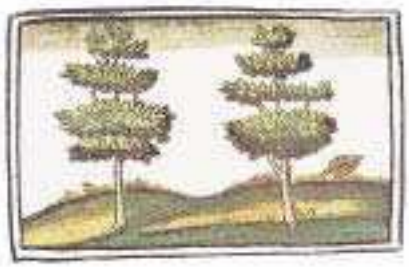
Federn entstanden früher als die Vögel – in einer Gruppe räuberischer Dinosaurier. Zum Fliegen dienten die Hautgebilde anfangs nicht.

SEITE 70

ARCHÄOLOGIE

Die Gärten der Azteken

Ein Fest ohne Blumengebinde war im Reich der Azteken undenkbar. Um stets mit Blüten, aber auch mit Heilpflanzen gut versorgt zu sein, ließen die Herrscher prächtige Parks anlegen und manchmal sogar Krieg führen.

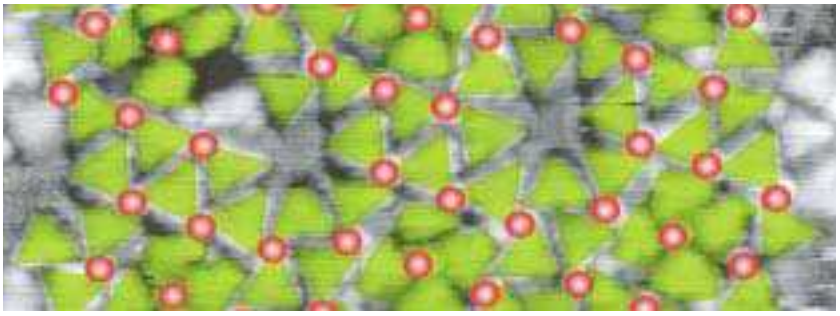


SEITE 78

REPORT

Nanoschichten für die Elektronik

Noch ein Traum: Festplatten, die pro Atom ein Bit speichern können. Magnetische Nanoschichten weisen den Weg. Die Realität ab 2010: Lithografie mit extremem Ultraviolettlicht für noch kleinere, schnellere Chips.



88 Matrix Reloaded
Sind wir nur Simulationen innerhalb eines Computerprogramms?

91 Kein allgemeiner Werteverfall
Wie die Welt-Werte-Studie die Deutschen im internationalen Vergleich sieht

REZENSIONEN

94 ▷ **Gesteine** von Peter Rothe ▷ **Der kreative Kosmos** von Thomas Görnitz und Brigitte Görnitz ▷ **Die Präzision der Präzession** von Franz Krojer ▷ **Zwischen Leben und Tod** von Peter Stark ▷ **Codebreakers** von Bengt Beckman ▷ **Die ägyptischen Oasen** von Joachim Willeitner ▷ **Ethik des Embyonenschutzes** von Norbert Hoerster

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

107 Kleine Drachen

KOMMENTAR

90 Am Rande
Warum Ordnung keinen Sinn mehr macht

WISSENSCHAFT IM ...

42 Alltag: Transdermale Pflaster

60 Unternehmen: Stammzell-Therapie nach Herzinfarkt

76 Rückblick: Pflanzen auf dem Mars, Tragbarer Brutkasten u. a.

103 Internet: Die virtuelle Arche Noah

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial · 6 Leserbriefe/Impressum · 104 Preisrätsel · 111 Stellenmarkt · 114 Vorschau

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Die Entschlüsselung der Wirtschaft

Die klassische Lehre vom Markt mit seinem Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage ist bis zur Unkenntlichkeit erweitert worden.

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

LESERBRIEFE

Laser für Leser

Wissenschaft in Unternehmen, Juli 2003

Ist der Augapfel zu kurz, müssen die auf das Auge treffenden Strahlen generell stärker gebrochen werden als beim normalen Auge. Nahe Gegenstände können nicht scharf gesehen werden, da sich die Linse nicht über das normale Maß hinaus krümmen kann. Weit entfernte Gegenstände können dagegen scharf gesehen werden, wenn die Linse nicht – wie üblicherweise beim »Fern-sehen« – abgeflacht wird, sondern sich krümmt. Die Aussage »… ist es [das Auge] zu kurz, sieht man nur in der Nähe gut …«, ist also nicht richtig.

Claudia Polzin, Berlin

Aufdringliche Duschvorhänge

Physikalische Unterhaltungen, Juni 2003

Das Problem mit dem in die Kabine drängenden Duschvorhang haben wir für uns bereits vor über zwanzig Jahren gelöst. Obwohl man meinen sollte, dass der auf den Vorhang gerichtete Luftstrom eines Elektro-Heizlüfters diesen noch weiter in die Dusche drängen sollte, geschieht das genaue Gegenteil: Ein Druckausgleich findet statt, und der Vorhang hängt nun wunderbar gerade.

Gleichzeitig wird kurzfristig dem erhöhten Wärmebedarf insbesondere in den kälteren Monaten Rechnung getragen.

Heino Dompke, Rosendahl

Der Charme des Champagners

Juli 2003

In seinem Artikel begründet der Autor Gérard Liger-Belair die Größenzunahme der im Glas aufsteigenden Champagner-Perlen mit einer kontinuierlichen Zunahme der Kohlendioxid-Diffusion.

Ein wesentlicher Teil der Volumenzunahme beruht aber wohl auf der Abnahme des hydrostatischen Drucks der umgebenden Flüssigkeit, ähnlich der Ausdehnung der komprimierten Luft in der Lunge eines aus der Tiefe aufsteigenden Tauchers, wenn er seine Pressluftflaschen am Grund einmal zurücklassen müsste.

Dr. C. Brandlmaier, Wels, Österreich

LANDESGENDARMERIEKOMMANDO FÜR TIROL, ÖSTERREICH

▲ Nach über 5000 Jahren tauchte diese Leiche am Rande eines Gletschers auf, wo das in ihrem Darm in Spuren gefundene Glatte Neckermoos nicht wächst.

Die Herkunft von Ötzi

Juli 2003

Die Autoren erwähnen, dass im Magen-Darm-Trakt der Mumie Moose gefunden wurden. Es kann durchaus sein, dass Ötzi diese bewusst als Heilmittel zu sich genommen hat und nicht nur unabsichtlich als anhaftende Verpackungsreste an der sonstigen Nahrung. Prof. Frahm vom Institut für Bryologie (Moskunde) an der Universität Bonn hat zum Beispiel einmal im Selbstversuch einen alkoholischen Moosextrakt zu sich genommen und dabei eine wohltuende Wirkung auf den Verdauungstrakt festgestellt. Moose enthalten nämlich hochpotente fungizide Wirkstoffe und sind auch antibakteriell wirksam. (Die Wikinger haben etwa Fisch in Torfmoos eingeschlagen, um ihn haltbarer zu machen.) Darüber hinaus enthalten Moose auch zellteilungshemmende Wirkstoffe, die mindestens in vitro das übermäßige Wachstum von Mäusekrebszellen auf das normale Maß zurückführen.

Dr. Stefan Brosig, Stuttgart

Paralleluniversen

August 2003

Andere Universen jenseits unseres kosmischen Horizonts,

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg, Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Andreas Merkert (stv. Hersteller), Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-711, Fax (06221) 91 26-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-600, Fax (06221) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (02244) 4303, Fax (02244) 6383, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (0211) 9083357, Fax (0211) 9083358, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (06221) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (06221) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Sabine Anagnostou, Hermann Englert, Daniel Fischer, Dr. Markus Fischer, Isabel Grasa, Andrea Jungbauer, Dr. Frank Scholz.
Leser- und Bestellservice: Tel. (06221) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. (06201) 60 61 50, Fax (06201) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (0211) 887-23 79, Fax (0211) 887-23 99; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-23 76, Fax (0211) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. (030) 61 68 61 50, Fax (030) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. (040) 30 183/-183/-194, Fax (040) 33 90 90; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 301 35-20 60, Fax (0211) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. (069) 24 24-45 36, Fax (069) 24 24-45 55; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, D-70173 Stuttgart, Tel. (07 11) 22 475-40, Fax (07 11) 22 475-49; München: Bernd Schwetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. (089) 54 59 07-14, Fax (089) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-2387, Fax (0211) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 24 vom 01.01.2003.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

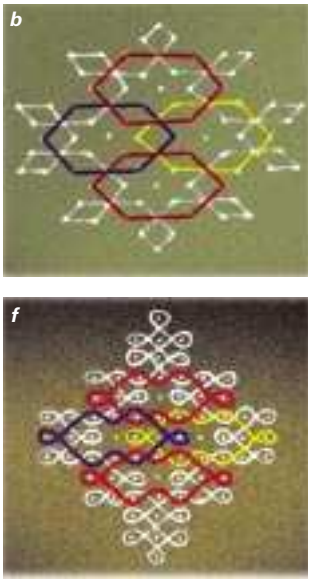
Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2003 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

das mag ja noch angehen. Doch wenn die Kosmologen Universen diskutieren, die sich verknotet in diversen Raumdimensionen, mit völlig anderen physikalischen Gesetzen auf mehreren Zeitachsen in unendlicher Parallelität entwickeln, dann ist es doch wohl einfacher, das große Buch der Kosmologie endgültig zuzuklappen. Und man sollte dem lieben Gott das Terrain überlassen, für den ja nun, uneingeschränkt durch konventionelle naturwissenschaftliche Vorgaben, genügend Platz vorhanden ist. Aber nein, nicht einem lieben Gott, sondern 10 hoch 10 hoch 28 Götzen, lieben und bösen, positiven und negativen, rechtshändigen und linkshändigen, solchen mit und ohne Charme, gleichgültigen ...

Dr. Wilfried Stoll, Möhnese



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG K. L. KAMAT / DORIS KURZ

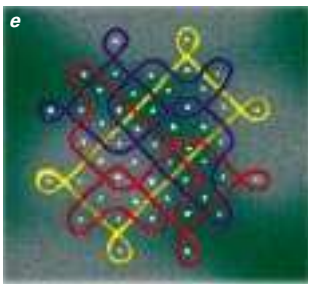
Die Kolam-Figuren Südindiens

Juni 2003

Die auf S. 76 abgebildeten Figuren b, e und f lassen sich wie die Figur d in Untereinheiten zerlegen (Bild). Wenn man sie mit Farbe nachzieht, erkennt man, dass die Figur e aus drei geschlossenen Kurven besteht, von denen zwei zueinander punktsymmetrisch sind.

Die Figuren b und f lassen sich jeweils in vier kongruente, geschlossene Kurven zerlegen, die von einer Randlinie umrundet werden.

Doris Kurz, Altbach



▲ Zeichnungen nach der Regel: keine Linie doppelt und an den Kreuzungen geradlinig

Mineralwasser

Wissenschaft im Alltag
August 2003

Das Mineralwasser enthält kein metallisches »Eisen, das rosten kann«, sondern ein lösliches, unter Luftabschluss beständiges Eisensalz (das Eisenhydrogencarbonat). Vom Sauerstoff der Luft wird es oxidiert und hydrolysiert dann zum Eisenhydroxid ($4\ Fe(HCO_3)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 8CO_2$), das unlöslich ist, sich in braunen Flocken abscheidet, das Wasser unansehnlich macht und deshalb abfiltriert wird.

Alfred Schmidpeter, München

Götterwahn und Menschenopfer

Forschung und Gesellschaft
August 2003

Das Foto auf S. 76 zeigt nicht das Areal vom »Templo Mayor«, sondern den »Platz der drei Kulturen« in Tlatelolco, einige Kilometer weiter nördlich, wobei zur Zeit der Azteken Tlatelolco eine eigenständige Stadt neben Tenochtitlan und der Hauptmarkt war. Heute ist alles zu einer Stadt zusammengewachsen.

Blanca Frisch de Flick und
Prof. Heiner Flick, Marktoberdorf

Kraftwerke der Zukunft

Technologie-Report, April 2003

Ein Aspekt wird bei der Betrachtung regenerativer Energien immer wieder vernachlässigt: Biogas. Auf lange Sicht werden wir nicht nur eigens als Energie- und Rohstoffträger angebaute Pflanzen nutzen, sondern auch vergärbare Abfälle wie Grünschnitt von Autobahnen und Parkanlagen zur Rohstoff- und Energiegewinnung einsetzen müssen.

Dr. Andreas Fuß, Staufenberg

Hilfsbereit und höflich?

Editorial, August 2003

Die Erwähnung der Ereignisse am Münchner Olympiasee, bei dem zwei Buben trotz vieler Zuschauer ertranken, hat wieder alte Erinnerungen aufgerufen und mich sehr betroffen gemacht. Es war dies nämlich keineswegs das erste Mal, dass so etwas passiert ist.

In der Neujahrswoche 1971/72 sah ich aus wohl hundert Meter Entfernung, wie zwei etwa zehnjährige Mädchen an derselben Stelle ins Eis einbrachen. Binnen Sekunden standen fünfzig bis hundert Leute am Seerand und rührten sich nicht. Sie schauten einfach nur zu. Während sich das eine Mädchen schnell aus dem Wasser retten konnte, geriet das andere immer mehr in Panik, die Leute schauten immer noch zu.

Nach einem kurzen Spurt zum Ufer begab ich mich aufs Eis; als es unter mir zu krachen begann, legte ich mich auf den Bauch und erreichte das Mädchen. Erst als ich es mangels eigenem Halt nicht herausziehen konnte, lösten sich endlich zwei junge Männer aus der Menge und zogen mich und das Mädchen an meinen Beinen wieder auf festes Eis.

Mit dem pitschnassen Kind im Arm lief ich ins Restaurant des Olympiaturms, wo man mir Zutritt und Hilfe verwehrte. In meiner Not zog ich es aus und stellte es in der Damentoilette unter den Händetrockner, bis endlich der Rettungswagen kam, den ich auch noch selbst rufen musste.

Irgendwie ist das alles sehr komisch. Warum habe ich geholfen? Es schien mir so selbstverständlich. Und warum die anderen nicht, die doch viel näher dran waren? Es war wie ein Bann, der auf der Menge lastete, der teilweise dadurch gebrochen wurde, dass sich dann doch einer bewegte. Aber warum half auch nachher keiner im Restaurant, zumindest mit einem Tischtuch zum Umhängen oder vielleicht einer Couch im Büro des Geschäftsführers? Wenn ich dann von den zwei Buben höre, die dort vielleicht zehn Jahre später ums Leben kamen, plagen mich irrationale Gewissensbisse, warum ich denn nicht zur Stelle war.

Es hat ein bisschen wehgetan, dass ich als junger Student die Reinigung meines Mantels selbst zahlen musste, und auch sonst, wie niemand von den Ereignissen Notiz nahm. Aber die großen braunen Augen des Mädchens, voller Todesangst und voller Lebenshoffnung, als ich Zentimeter für Zentimeter näher robbte, sehe ich immer noch vor mir, und das ist eine Belohnung, die nur ich bekam, und keiner von den Gaffern.

Peter Solymosi, Polling

SPEKTROGRAMM

KOSMOLOGIE

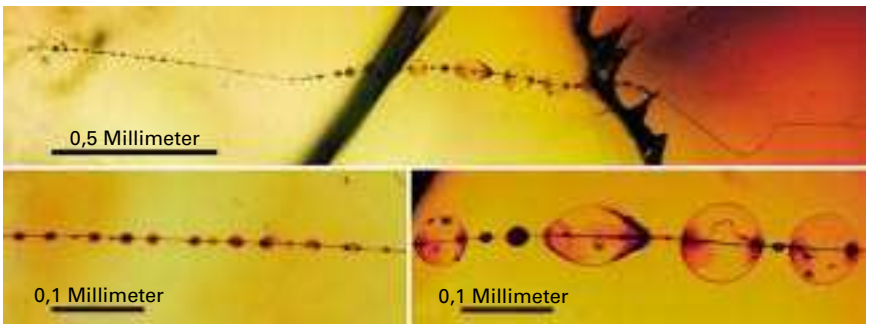
Dunkle Energie direkt beobachtet

Zu mehr als zwei Dritteln besteht das Universum offenbar aus Dunkler Energie, einer geheimnisvollen abstoßenden Kraft. Ihre Existenz wird vermutet, seit Wissenschaftler entdeckten, dass sich die Expansion des Kosmos beschleunigt, obwohl sie sich wegen der Gravitation eigentlich verlangsamen müsste. Forscher um Ryan Scranton von der Universität Pittsburgh (Pennsylvania) haben nun erstmals direkte Anzeichen der Dunklen Energie gefunden. Sie untersuchten die allgegenwärtige kosmische Hintergrundstrahlung, die seit dem Urknall das All durchzieht. Dabei stellten sie fest, dass die Lichtteilchen überall dort eine höhere Frequenz aufweisen, wo sie massereiche Objekte – wie Galaxien – passiert haben. Demnach haben die Photonen im Vorbeiflug Energie gewonnen. Dies lässt sich am besten durch die Wirkung der abstoßenden Dunklen Energie erklären.
(Physical Review Letters, im Druck)

PALÄOZOOLOGIE

Moderne Netzspinnen doch schon von vorgestern

Spinnen, die Seide produzieren, gibt es seit 410 Millionen Jahren. Allerdings sahen ihre Netze anfangs wohl eher primitiv aus. Die Araneoidea, die modernen Netzspinnen, entstanden erst sehr viel später. Ihre neue Errungenschaft waren komplizierte Gewebe aus klebrigen Fäden, mit denen sie Beute festhalten können. Bisher galt ein klebriger Spinnenfaden aus baltischem Bernstein mit 40 Millionen Jahren als ältester Nachweis. Nun hat Samuel Zschokke von der Universität Basel in einem schon 1969 im Libanon gefundenen Bernstein ein noch wesentlich älteres Stück Spinnenseide entdeckt: einen vier Millimeter langen Faden, der vor 130 Millionen Jahren eingeschlossen wurde. Mit seinem Wechsel von großen und kleinen Klebstoff-Tröpfchen, von denen im Durchschnitt 22 auf einen Millimeter kommen, zeigt er genau das Muster, das sich auch bei den modernen Araneoidea findet. Zschokke vermutet allerdings, dass der Faden nicht von einem Radnetz stammt, sondern von einem weniger regelmäßigen Haubennetz, wie es von Kugelspinnen gewebt wird. Zu ihnen gehört heute beispielsweise die Schwarze Witwe. *(Nature, 7.8.2003, S. 636)*



NATURE PUBLISHING GROUP

▼ Vor 130 Millionen Jahren wurde dieser Spinnenfaden samt Klebstoff-Tröpfchen in Bernstein eingeschlossen (unten Ausschnitte).

MEDIZIN

Junge Nerven gegen Depression

Antidepressiva wirken meist erst nach Wochen, was sich bisher nicht recht erklären ließ. Das Team um René Hen von der Columbia-Universität in New York fand nun heraus, dass der gemütsaufhellende Effekt einiger Medikamente wahrscheinlich auf die Neubildung von Nerven im Hippocampus zurückgeht – jener Hirnregion, die mit Lernen und Gedächtnis zu tun hat. Junge Neuronen sind flexibler in der Ausbildung von Kontakten, was dem Gehirn die Bewältigung von Stress erleichtern könnte. Viele Antidepressiva wie Fluktin (Prozac) erhöhen die Konzentration des Nervenbotenstoffs Serotonin, der zumindest bei Embryonen das Zellwachstum fördert. Bei Mäusen wirkten sie nicht, wenn die Forscher durch regelmäßige Bestrahlung dafür sorgten, dass neu gebildete Neuronen abgetötet wurden. Auch nach monatelanger Behandlung blieben die Versuchstiere ängstlicher und gestresster als die einer Kontrollgruppe. Gelten die Ergebnisse auch für den Menschen, könnten wirksamere Medikamente entwickelt werden, die das Nervenwachstum direkt stimulieren. *(Science, 8.8.2003, S. 805)*

Rund um Galaxien (hier M 33) ist die Hintergrundstrahlung wärmer – ein Hinweis auf das Wirken der Dunklen Energie.

TRAVIS RECTOR / NRAO / AUI

GEOLOGIE

Heiße Brutstätten des Lebens

Vor knapp drei Jahren wurde im Atlantik ein Feld von Heißwasser-Schloten entdeckt und auf den Namen Lost City (»verschwundene Stadt«) getauft. Nun haben Forscher die Kalksteinformation genauer untersucht. Die bis zu sechzig Meter hohen Röhren entstanden nicht vulkanisch, sondern durch chemische Reaktionen. In der Nähe von mittelozeanischen Rückensystemen, an denen aufsteigendes Magma frische Erdkruste bildet, können auch Peridotite, Ge-

UNIVERSITY OF WASHINGTON

▲ An heißen Quellen am Meeresboden fällt Kalk aus und türmt sich mit der Zeit zu mächtigen Schloten auf.

steine des Erdmantels, bis dicht unter den Meeresboden gelangen. Wenn sie dort mit versickertem Meerwasser reagieren, wandelt sich Olivin in Serpentin um. Dabei wird Wärme frei und erzeugt Temperaturen bis 75 °C. Das erhitzte Wasser steigt auf und löst weitere Mineralien aus dem Untergrund. Einige davon – wie Carbonate – fallen in kaltem Wasser wieder aus und türmen sich so mit der Zeit als Schlote um die Austrittsöffnung. In Lost City siedelt eine spezialisierte Lebensgemeinschaft, an deren Basis Bakterien stehen, die von den ausgeschwemmten Mineralien leben. Die ältesten Schlote sind schon seit 30 000 Jahren aktiv und könnten es noch mehrere Jahrmillionen bleiben. Vermutlich waren solche Hydrothermalquellen in frühen Erdzeitaltern weit verbreitet. Ihr stabiles, relativ lebensfreundliches Klima könnte die Entwicklung von ersten Lebensformen begünstigt haben. *(Science, 25. 7. 2003, S. 495)*

ARCHÄOLOGIE

Ältestes Sonnenobservatorium Europas

Schon die Menschen der Jungsteinzeit interessierten sich offenbar für astronomische Phänomene. Darauf weist ein Sonnenobservatorium hin, das Forscher bei Goseck in Sachsen-Anhalt kürzlich anhand von Luftbildaufnahmen entdeckt und durch Funde aus der stichbandkeramischen Kultur auf 5000 bis 4800 v. Chr. datiert haben. Zwar war diese älteste bekannte Kreisgrabenanlage Europas – das englische Stonehenge ist 3000 Jahre jünger – vor allem ein religiöses Heiligtum, ihr Bau zeugt aber eindeutig auch von astronomischem Wissen. So sind im Unterschied zu vergleichbaren Monumenten Außenmauer, Graben und innere Palisaden von drei statt zwei oder vier Toren durchbrochen. Dabei markiert das südöstliche Tor genau den Ort, wo die Sonne zur Wintersonnenwende aufgeht, und das südwestliche, wo sie am selben Tag versinkt. Das Erdbauwerk diente somit auch als kalendarischer Fixpunkt, der für die ersten Bauern wahrscheinlich von großer Bedeutung war. Die älteste Himmelsdarstellung, die Himmelsscheibe von Nebra, fand sich nur 25 Kilometer entfernt. Sie ist zwar etwa 2400 Jahre jünger; aber Ähnlichkeiten zwischen ihr und dem Aufbau sowie der Ausrichtung der Gosecker Anlage sind unverkennbar. Sie lassen auf eine lange Tradition der Himmelsdarstellung schließen. *(Landesamt für Archäologie Sachsen-Anhalt, 7. 8. 2003)*

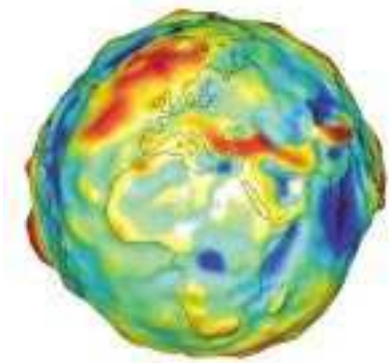
KAROL SCHAUER / LANDESAMT FÜR ARCHÄOLOGIE SACHSEN-ANHALT

▼ Rekonstruktion der Kreisgrabenanlage von Goseck, die auch als Sonnenobservatorium diente

FERNERKUNDUNG

Beste Karte des Erdschwerefeldes

Seit März 2002 kreisen zwei Satelliten im Abstand von 220 Kilometern zueinander um die Erdpole. Mit dem Global Positioning System (GPS) und einem Mikrowellenstrahl, der die beiden verbindet, lassen sich ihre Geschwindigkeit und ihr Abstand so genau messen, dass schon eine gravitationsbedingte relative Positionsänderung von nur wenigen Mikrometern feststellbar ist. Dadurch bietet das im All schwebende Zwillingssatellitensystem die Möglichkeit, selbst minimale Variationen der Erdanziehungskraft zu messen, wie sie beispielsweise durch Gebirge oder unterseeische Bergrücken hervorgerufen werden. Aus seinen ersten Daten wurde nun im



NASA / GFZ

▲ Dank Grace lässt sich das Geoid – die verbeulte Kugel, die ein den Globus bedeckender Ozean unter dem Einfluss der Erdanziehung bilden würde – jetzt zentimetergenau bestimmen.

Rahmen des Gemeinschaftsprojektes Grace *(Gravity Recovery and Climate Experiment)* von Nasa, Deutschem Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) die bisher genaueste Karte des Gravitationsfeldes der Erde erstellt. Geplant ist eine monatliche Aktualisierung. So hofft man, die durch Massenumlagerungen im Erdinnern, auf den Kontinenten und in den Ozeanen bewirkten Änderungen des Schwerefeldes verfolgen zu können. Das soll unter anderem dabei helfen, den Verlauf der Meeresströmungen und deren Auswirkung auf das Klima präziser zu ermitteln. *(GFZ Potsdam, 28. 7. 2003)*

PNAS 2003

◀ Ameisen zweier unterschiedlicher Kasten auf einem Pilzgarten. Über die Kastenzugehörigkeit entscheiden primär die väterlichen Gene.

ZOOLOGIE

Einflussreiche Ameisenväter

Eigentlich haben männliche Ameisen im Insektenstaat nicht viel zu sagen. Nach dem Hochzeitsflug mit der Königin, bei der gleich mehrere zum Zuge kommen, werden sie von den Arbeiterinnen kurzerhand aus dem Nest geworfen. Auf das Schicksal ihrer rein weiblichen Nachkommen (Männchen entstehen aus unbefruchteten Eizellen) haben sie aber offensichtlich mehr Einfluss, als bisher gedacht. William Hughes von der Universität Kopenhagen und seine Mitarbeiter fanden heraus, dass es vor allem von den Genen des längst verstorbenen Vaters abhängt, welcher Kaste die Tochter dereinst angehört – ob sie also etwa ein eher kleines, zierliches »Hausmütterchen« oder eine größer gewachsene »Sammlerin und Kriegerin« wird. Bisher galten das Futter und chemische Signale als entscheidend für die spätere Gestalt der Larve. Aber als Hughes und seine Kollegen mit Gentests die Töchter einzelner Männchen der Blattschneiderameise *Acromyrmex echinatior* identifizierten, stellten sie fest, dass im Durchschnitt 80 Prozent derselben Kaste angehörten. Vermutlich legen die Gene die Reizschwelle fest, ab der eine Larve auf Pheromone oder Futterinhaltsstoffe anspricht, die ihre Kastenzugehörigkeit beeinflussen. Die Forscher spe-kulieren, dass das Zusammenwirken aus Umweltreizen und Genen eine flexiblere Reaktion auf Umweltänderungen ermöglicht. *(Proceedings of the National Academy of Sciences, 5. 8. 2003, S. 9394)*

NEUROPHYSIOLOGIE

Ionenkanäle fördern Vergesslichkeit

Im Alter wird der Mensch vergesslich – aber warum eigentlich? Forscher am Max-Planck-Institut für experimentelle Medizin in Göttingen sind dieser Frage bei Mäusen nachgegangen; denn auch deren Gedächtnis lässt mit den Jahren nach. Wenn man eine alte Maus zum Beispiel darauf trainiert, einen Warnton mit einem erst nach 15 Sekunden folgenden leichten Stromstoß zu verbinden, kann sie sich am nächsten Tag deutlich schlechter daran erinnern als eine junge Artgenossin. Solche assoziativen Lernleistungen erfordern bei Säugetieren die Beteiligung des Hippocampus. In diesem Gehirnteil machten die Forscher um Joachim Spiess nun eine erstaunliche Entdeckung: Alte Mäuse haben dort mehr kalziumaktivierte Kaliumkanäle als junge, was die Lernleistung mindert; der Grund dafür ist bisher nicht genau bekannt. Wurden diese so genannten SK3-Kanäle im Gehirn betagter Nager blockiert, waren die Tiere wieder genauso lernfähig wie ihre jungen Artgenossen. Nun hoffen die Forscher, den Kanal über Pharmaka selektiv regulieren zu können. Das böte einen viel versprechenden neuen Ansatz, der Altersvergesslichkeit zu begegnen. *(Nature Neuroscience, im Druck)*

THOMAS BLANK, MPI FÜR EXPERIMENTELLE MEDIZIN, GÖTTINGEN

▼ Auch alten, vergesslichen Mäusen geht wieder ein Licht auf, wenn die Aktivität von Ionenkanälen namens SK3 im Gehirn künstlich gedrosselt wird.

Laufen mit Ruderkraft

Federleicht scheint der Wasserläufer über die Oberfläche des Sees zu gleiten. Nach bisheriger Theorie sollen winzige »Kapillarwellen«, die das Tier durch seine Beinbewegungen erzeugt, für den Antrieb sorgen. David Hu und seine Kollegen am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge haben dies nun aber widerlegt. Sie filmten mit einer Hochgeschwindigkeitskamera Versuchstiere der Art *Gerris remigis* beim Laufen über eine Wasserfläche, auf die sie eine dünne Schicht Thymolblau-Pulver gestreut hatten. Die sternfömige Textur in der Aufnahme entstand dadurch, dass die Farbstoffteilchen von einem Pulverhäufchen im Zentrum nach außen strebten. Dieses Häufchen wurde von unten angestrahlt, sodass sich der Wasserläufer darauf zu bewegte. Dabei hinterließ er unter der Wasseroberfläche ähnliche Wirbel wie Ruderpaare, die ein Boot vorantreiben. Sie sind als Störungen der sternförmigen Textur deutlich erkennbar. Auch ein Roboter, den die Forscher dem natürlichen Vorbild nachempfanden, kam nach diesem Prinzip voran.

JOHN BUSH, MIT

GEOPHYSIK

Satellit spürt ozeanische Magnetfelder auf

Strömendes Meerwasser liefert einen Beitrag zum Erdmagnetfeld. Am Beispiel der Gezeiten ist es erstmals gelungen, diesen winzigen Effekt von einem Satelliten aus zu messen. Im Prinzip eröffnet das eine neue Möglichkeit, Meeresströmungen aus dem All zu verfolgen.

Von Thilo Körkel

Großräumige Verschiebungen von Wassermassen wirken sich stets auch auf das globale Klima aus. Entsprechend viel Wert legen Forscher darauf, Phänomene wie den Antarktischen Zirkumpolarstrom, den Golfstrom oder pazifische Meeresströmungen, wie sie mit El Niño in Zusammenhang stehen, präzise zu vermessen. Derzeit stützen sie sich dabei vor allem auf Radar-Altimeter von Satelliten, welche die lokale Meereshöhe zentimetergenau bestimmen. Aus solchen Daten lassen sich indirekt Erkenntnisse über das Verhalten weltweiter Strömungssysteme gewinnen.

Künftig könnten aber auch magnetische Signale der Ozeane Aufschluss über großräumige Verschiebungen von Wassermassen geben. Ergebnisse eines Forscherteams der Universität von Washington in Seattle und des GeoForschungsZentrums Potsdam (GFZ) legen nahe, dass man auf diese Weise, zumindest im Prinzip, selbst Strömungen in der Arktis messen könnte – wo Radarwellen versagen, weil sie an der geschlossenen Eisdecke abprallen *(Science, Bd. 209, S. 239)*.

Die nötigen Daten liefert beispielsweise der im Juli 2000 gestartete Satellit Champ (*Challenging Microsatellite Payload,* Bild unten), betrieben unter wissenschaftlicher Leitung des GFZ. Aus seinen hochpräzisen Messungen des Erdmagnetfelds filterten die Forscher jetzt erstmals die winzigen ozeanischen Signale heraus, welche das in Satellitenhöhe um vier bis fünf Größenordnungen stärkere Hauptfeld überlagern.

Ursache dieser Signale sind Ladungsträger im Meerwasser, die dessen Bewegung folgen und dabei ein Magnetfeld erzeugen. Der Ozeanphysiker Robert Tyler von der Universität von Washington war schon Anfang der 1990er Jahre überzeugt, dass es gelingen müsste, dieses Feld aus dem All zu identifizieren. Präzise Messungen waren damals jedoch Mangelware, weil nur ein tief fliegender Satellit sie liefern kann. Die letzte solche Sonde, der von der Nasa betriebene Magsat, hatte aber schon 1980 seine Mission beendet.

Erst nun, rund zwanzig Jahre später, wird das Erdmagnetfeld wieder aus niedriger Höhe vermessen – unter anderem von Champ, der von seiner anfangs 460 Kilometer hohen Flugbahn im Lauf seines fünfjährigen Betriebs auf 300 Kilometer absinken wird. Gemeinsam mit Stefan Maus und Hermann Lühr vom GFZ machte sich Tyler daran, anhand der Champ-Daten seine Hypothese zu überprüfen.

Kurzschluss im Meer

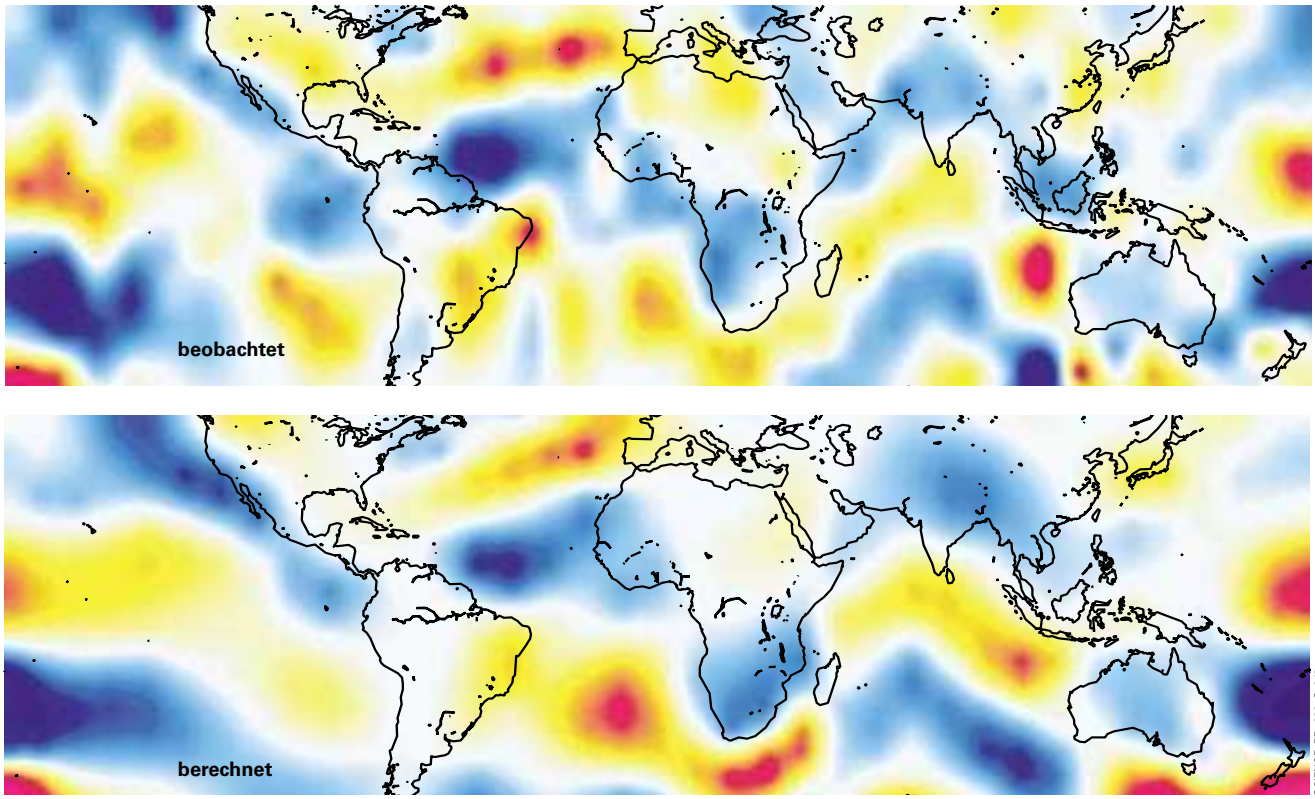
Im Meerwasser gelöste Salze bilden hydratisierte Ionen. Diese bewegen sich mit den Ozeanströmungen durch das Magnetfeld der Erde. Als elektrisch geladene Teilchen unterliegen sie dabei der so genannten Lorentz-Kraft: Sie ist senkrecht zu den Magnetfeldlinien und zur Bewegungsrichtung der Ionen gerichtet und lässt diese deshalb aus dem allgemeinen Wasserstrom ausscheren. Negative und positive Teilchen wandern dabei in entgegengesetzte Richtungen.

So kommt es zu einer Ladungstrennung, durch die Ansammlungen von negativen und positiven Ionen im Meerwasser entstehen. Zwischen diesen bildet sich ein elektrisches Feld, das bestrebt ist, die entgegengesetzten Ladungsträger wieder aufeinander zu zu bewegen. Es nimmt so lange zu, bis es die Lorentz-Kraft genau ausgleicht und die Ladungstrennung zum Stillstand bringt.

Entscheidend ist nun, dass die Ansammlungen von entgegengesetzt geladenen Ionen über die wassergetränkten Sedimente am Meeresboden leitend verbunden sind. Dort gibt es keine Wasser-

GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM

Der Satellit Champ vermisst seit Juli 2000 das Magnet- und Gravitationsfeld der Erde aus einer niedrigen Umlaufbahn. Seine Daten erlaubten jetzt erstmals, die winzigen Beiträge von Gezeitenströmungen zum Erdmagnetfeld zu ermitteln.



SCIENCE, BD. 299, S. 240

Der in 430 Kilometern Höhe gemessene Beitrag von Gezeitenströmungen zum Erdmagnetfeld (oben) deckt sich ziemlich genau mit der theoretischen Vorhersage (unten). Sogar bei regionalen Spitzen (rot und dunkelblau) bestehen in den meisten Fällen Übereinstimmungen.

strömung und folglich auch keine Lorentz-Kraft. Deshalb können die getrennten Ladungsträger hier in einer Art Kurzschluss wieder zusammenfließen.

Dieser Kurzschlussstrom endlich erzeugt das Magnetfeld, um das es den Forschern geht. Seine Amplitude erreicht zwar gerade einmal zehn Nanotesla. Da es sich aber mit der Entfernung nur sehr langsam abschwächt, ist es noch in mehreren hundert Kilometern Höhe nachweisbar. Obwohl andere Anteile des ozeanischen Magnetfelds mit bis zu hundert Nanotesla deutlich stärker sind, bleiben sie auf den Ozean und die Sedimente beschränkt.

Für den Test der Theorie wählten die Forscher aus dem magnetischen Signal aller Meeresströmungen wiederum nur einen Anteil aus, der sich ziemlich leicht berechnen lässt, weil seine Quelle genau bekannt und sehr regelmäßig ist. Dieser Anteil rührt von der so genannten M2-Tide her. Als Tide oder Gezeit bezeichnet man die Folge aus einer Flut und der anschließenden Ebbe, also die Spanne zwischen einem Niedrigwasser und dem nächsten. Die vom Mond verursachte M2-Tide mit ihrem halbtägigen Rhythmus ist die wichtigste der vielen so genannten Partialtiden, die sich letztlich zu Ebbe und Flut überlagern. (Eine schwächere Komponente mit demselben Rhythmus ist die S2-Tide, die sich auf die Sonne zurückführen lässt). Zunächst berechnete das Team also, in welcher Weise die M2-Tide das ozeanische Magnetfeld beeinflussen müsste.

Gezeiten als Testfall

Dabei modellierten die Forscher den oben geschilderten Kurzschlussstrom als dreidimensionalen räumlichen Stromkreis – genauer als Stromvektorfeld, das durch die Lorentz-Kraft angetrieben wird. Ihren Berechnungen legten sie Informationen über die Topografie und Leitfähigkeit des Meeres und der Sedimente sowie die horizontale Strömungsgeschwindigkeit der betrachteten Tide zu Grunde. Parallel dazu analysierten die Forscher die Champ-Daten zwischen August 2000 und Juli 2002.

Um störende Einflüsse weitgehend auszuschließen, trafen sie dabei erneut eine Auswahl. So berücksichtigten sie nur die Nachtstunden von 22 bis 6 Uhr, jeweils in lokaler Zeit. Das stellte sicher, dass die gesuchten Signale nicht durch den Einfluss elektrischer Ströme aus der tagsüber durch Sonnenstrahlung gut leitenden Ionosphäre überlagert wurden. Zudem blieben Regionen jenseits sechzig Grad nördlicher oder südlicher Breite ausgeblendet. Auf diese Weise wurden Störungen durch »polare Elektrojets« vermieden: Ströme, die in der auch nachts elektrisch gut leitenden polaren Ionosphäre in etwa hundert Kilometern Höhe durch Potenzialunterschiede in der fernen Magnetosphäre induziert werden.

Von den verbliebenen Daten zogen die Forscher zunächst alle bekannten Magnetfeldbeiträge ab. Dazu griffen sie auf ein Magnetfeldmodell zurück, das unter anderem von Lühr entwickelt wurde. Es trägt die Bezeichnung CO2, abgekürzt aus den Namen der drei Missionen, die derzeit das Erdmagnetfeld mit einer Genauigkeit im Nanotesla-Bereich vermessen. Außer Champ sind dies der 1999 gestartete dänische Satellit Ørsted und sein argentinisches Gegenstück SAC-C, das sich seit dem Jahr 2000 in einem erdnahen Orbit befindet und an Bord das Ørsted-2-Experiment mitführt.

CO2 lieferte den Forschern die Größe jener langwelligen Magnetfeldbeiträge, die nicht aus ozeanischen Strömungen stammen. Dazu gehören vor allem ▷

▷ die zeitveränderlichen Komponenten des Hauptfelds der Erde und der magnetosphärische Ringstrom, der mit einer Stärke von einigen Millionen Ampere um die Erde fließt. Neben diesen Anteilen wurden schließlich auch noch Beiträge aus dem Magnetfeld der Erdkruste abgezogen, die sich aus einem Modell ergaben, das Maus auf der Basis von Champ-Messungen entwickelt hat. Übrig blieb ein sehr schwaches Restfeld, das die ozeanischen Einflüsse enthalten sollte. Aus ihm filterten die Forscher mit einem mathematischen Verfahren all jene Komponenten heraus, die mit der M2-Periode von 12,4 Stunden variierten.

Es funktioniert!

Das Ergebnis war viel versprechend: Die aus den Messwerten von Champ extrahierten Magnetfeldbeiträge der Gezeitenströmung stimmten in hohem Maße mit den theoretischen Voraussagen der Wissenschaftler überein. Auch regionale Spitzenwerte, die sich aus den Berechnungen ergaben, fanden sich in den Satellitendaten wieder. Der erste Versuch, die ozeanischen Magnetfeldbeiträge quantitativ zu erfassen, scheint somit geglückt. Allerdings gibt es noch Ungereimtheiten. Dazu gehören unrealistische Magnetfeldquellen auf Landmassen wie Westaustralien oder ein seltsames Streifenmuster über dem Südpazifik.

Solche Fehler rühren vermutlich daher, dass zum Beispiel störende Magnetfeldbeiträge aus der Ionosphäre nicht vollständig aus den Messdaten eliminiert wurden. Noch muss das neue Verfahren beträchtlich verbessert werden, wenn es tatsächlich eine Alternative zu bewährten Methoden werden soll. Schließlich gelang der Nachweis der Gezeitenströme nur, weil es sich um ein regelmäßiges Phänomen mit bekannter Periode handelt. Nicht-periodische ozeanische Zirkulationen lassen sich anhand ihres Magnetfeldes bisher nicht erkennen.

Zudem liefern nach Ansicht der Forscher so genannte geostrophische Strömungen wie der Golfstrom – sie fließen entlang von Linien gleichen Wasserdrucks – ohnehin nur einen winzigen Beitrag zum Magnetfeld. Auch die Arktis bietet für das Verfahren angesichts der zu erwartenden Störeinflüsse durch die Ionosphäre erschwerte Bedingungen.

Dennoch hat der jetzt durchgeführte Test allein schon einen wichtigen Zweck erfüllt, indem er den Beweis lieferte, dass die theoretischen Vorstellungen über den magnetischen Effekt von Meeresströmungen richtig sind. Dieser Effekt bildet den größten Beitrag zum Erdmagnetfeld, der sich bislang noch nicht theoretisch modellieren ließ. Wird dies jetzt nachgeholt, kann man künftig den Feldanteil, der aus der Erdkruste und Teilen des Erdmantels stammt, besser von den ozeanischen Einflüssen trennen. Damit wird es möglich, Temperatur und Struktur dieser Regionen präziser zu bestimmen. ◁

Thilo Körkel ist Diplomphysiker und freier Wissenschaftsjournalist in Frankfurt am Main.

MIKROTECHNIK

Lasergetriebene Wasserpistole

Französischen Forschern ist es gelungen, mit Licht auf bestechend einfache Weise haardünne Flüssigkeitsstrahlen zu erzeugen.

Von Stefan Maier

Ob im Schreibkopf eines Tintenstrahldruckers, als »Wasserskalpell« bei Operationen oder als robotergesteuerte Füllstrahlen für Gen-Chips in Biolabors: Hauchdünne Flüssigkeitsstrahlen finden vielerlei Anwendung in Forschung und Technik. Allerdings sind sie relativ schwierig zu erzeugen. Druckluftdüsen etwa werfen bei Durchmessern von nur wenigen tausendstel Millimetern Probleme auf, da sich die Strahlen beim Passieren der kleinen Öffnungen durch Beugungsprozesse verbreitern und das Strahlprofil leicht durch Turbulenzen gestört wird. Zudem lässt sich die Strahlrichtung nicht ohne mechanische Bewegungen der Düse steuern.

Alexis Casner und Jean-Pierre Delville von der Universität Bordeaux haben nun eine überraschend einfache Alternative entwickelt *(Physical Review Letters, Bd. 90, S. 144503-1)*. Man nehme zwei nicht mischbare Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte und gieße sie in ein Gefäß. Dann schwimmt die leichtere auf der schwereren. Wenn nun ein Laserstrahl von oben auf die horizontale Grenzfläche zwischen beiden trifft, übt er einen Druck auf sie aus. Dadurch verbiegt sich die Trennschicht und bildet eine Ausbuchtung nach unten. Diese Beule wächst mit steigender Intensität des Laserstrahls. Schließlich wird sie zum rasch vorstoßenden Finger, aus dem sich ein dünner Strahl entwickelt, mit dem die obere Flüssigkeit die untere durchdringt. Dessen Richtung lässt sich über den Einschusswinkel des Laserstrahls frei steuern.

Das alles klingt so einfach, dass man sich unwillkürlich fragt, wieso nicht schon früher jemand auf die Idee gekommen ist. Schließlich investieren Universitäten und Industrielabors jährlich Millionen Euros in die Erforschung des Verhaltens von Flüssigkeiten auf kleinem Raum, nicht zuletzt zur Entwicklung neuer Darreichungsformen für Medikamente.

Doch der Teufel steckt wie so oft im Detail. Ein einfacher Laserpointer, Wasser und Speiseöl reichen leider nicht aus, um Mikrostrahlen durch ein Glas sausen zu lassen. Der Spielverderber heißt Oberflächenspannung. Jeder, der schon einmal einen Bauchplatscher im Schwimmbad vollführt hat, kennt sie. Eine analoge Kraft wirkt auch an der Trennschicht zwischen zwei Flüssigkeiten, und ihre Stärke ist proportional zum Dichteunterschied. Gegen diese Grenzflächenspannung kommt der Strahlungsdruck selbst der intensivsten kommerziell erhältlichen Laser normalerweise nicht an.

Ausgefallene Rezeptur

Das eigentliche Kunststück der französischen Forscher bestand deshalb darin, zwei Flüssigkeiten zu finden, deren Dichten sich nur minimal unterscheiden. Dass dies keineswegs so einfach ist, wie es sich anhört, zeigt die ziemlich ausgefallene Rezeptur, auf die sie schließlich verfielen: Sie versetzten das organische Lösungsmittel Toluol mit Wasser, Alkohol und Seifenlauge. Dabei entstand allerdings keine homogene Flüssigkeit. Da Wasser mit Toluol nicht mischbar ist, verteilte es sich darin in Form kleiner, von

den Seifenmolekülen umhüllter Tröpfchen, so genannter Mizellen.

Diese ziemlich komplexe Mixtur – Chemiker sprechen von Emulsion – zeigte nun eine Besonderheit, die das Problem der Grenzflächenspannung lösen half. Wenn man sie auf mehr als 35 Grad Celsius erwärmt, trennt sie sich spontan in zwei Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Tröpfchenkonzentrationen und damit verschiedenen Dichten auf. Diejenige mit der geringeren Anzahl von Mizellen bildet dabei die obere Schicht.

Der Clou bestand nun darin, dass sich die Grenzflächenspannung zwischen den beiden Flüssigkeiten durch die Temperatur genauestens einstellen lässt. Bei 35 Grad Celsius beträgt sie fast null – schließlich beginnt sich das Gemisch hier gerade erst aufzutrennen. Auch bei 36 Grad hat sie nur ungefähr ein Millionstel der Kraft, mit der sich die Wasseroberfläche des Schwimmbeckens der Verformung durch einen eintauchenden Körper widersetzt!

Der Rest des Experiments war relativ einfach: Die Forscher schossen einen grünen Laserstrahl von oben auf die Grenzschicht zwischen den beiden Flüssigkeiten. Während sie seine Intensität allmählich steigerten, konnten sie beobachten, wie sich eine immer tiefere Ausbuchtung bildete. Bei einer Laserleistung von etwa einem Watt wurde wie erwartet aus der Beule schließlich ein winziger Strahl, der die untere Flüssigkeit durchdrang.

Mit diesem Erfolg allein gaben sich die Forscher aber noch nicht zufrieden. Sie wollten das Verhalten ihrer Wasserpistole genauer analysieren. Dass die Stärke der Grenzflächenspannung von der Temperatur abhing, bot ihnen dazu eine relativ einfache Möglichkeit. So konnten sie mit geringem Aufwand systematisch prüfen, wie intensiv das Laserlicht unter verschiedenen Bedingungen sein muss, damit ein Mikrostrahl entsteht.

Dabei fanden sie auch die Antwort auf eine zunächst verblüffende Beobachtung: Während die Ausbeulung der Grenzschicht anfangs linear mit der Stärke des Lichtstrahls zunimmt, wächst sie irgendwann überproportional. Der Grund dafür ist, wie sich zeigte, der Brechungsindex. Diese Zahl gibt an, wie sehr sich ein Lichtstrahl in der jeweiligen Flüssigkeit gegenüber dem Vakuum verlangsamt. Da Wasser einen kleineren Brechungsindex als Toluol hat, besaß die untere, dichtere Flüssigkeit ebenfalls einen kleineren Brechwert. Damit aber war klar, dass hinter dem übermäßigen Anwachsen der Beule das wohlbekannte Phänomen der Totalreflexion stecken muss.

PHYSICAL REVIEW LETTERS, BD. 90, NR. 144503

Mit steigender Intensität des Laserlichts (Pfeil) vertieft sich die Delle in der Grenzfläche der beiden Flüssigkeiten, bis daraus schließlich ein Strahl wird (links). Dieser zerfällt nach etwa einem halben Millimeter in einzelne Tröpfchen (Mitte). Je nach Orientierung des Laserstrahls kann er auch schräg verlaufen (rechts).

Ein Lichtstrahl kann nämlich nicht von einem Stoff mit relativ hohem in einen mit geringerem Brechungsindex eindringen, sobald der Winkel, unter dem er auf die Grenzfläche trifft, zu klein ist. Dann wird er komplett reflektiert. Dieses Prinzip steckt etwa hinter den Glasfaserkabeln zur Telekommunikation.

Wie Licht die Kurve kriegt

Je mehr sich nun die Beule vertieft, desto kleiner ist der Winkel, unter dem der Laserstrahl von oben auf die Grenzfläche trifft. Irgendwann kommt es so zur Totalreflexion. Der Lichtstrahl wird dann, statt in die untere Flüssigkeit einzudringen, um die Vertiefung herumgelenkt und kehrt dabei seine Richtung um. Das erhöht den Strahlungsdruck auf die Grenzschicht drastisch, sodass diese plötzlich sehr viel stärker ausgebeult wird.

Daraus ergibt sich eine zusätzliche Bedingung für die beiden Flüssigkeiten: Die dichtere muss einen kleineren Brechungsindex aufweisen als die dünnere. Der praktische Nutzen des laserbetriebenen Mikrostrahls wird daher davon abhängen, ob sich technisch einsetzbare Flüssigkeitskombinationen auffinden lassen, die sowohl diese Bedingung erfüllen als auch einen genügend kleinen Dichteunterschied haben.

Außerdem gelten weitere Einschränkungen. So kann sich der Mikrostrahl natürlich ausschließlich innerhalb der unteren Flüssigkeit bewegen und nicht frei in der Luft, was viele Anwendungen von vornherein ausschließt. In dieser Umgebung erreicht er überdies nur geringe Geschwindigkeiten und keinen hohen Impuls, sodass er sich auch nicht für Schneidzwecke eignen dürfte.

Dennoch sieht Stephen Quake vom California Institute of Technology in Pasadena eine Reihe von Einsatzmöglichkeiten. Quake beschäftigt sich seit langem mit der Herstellung von winzig kleinen integrierten Flüssigkeitschips, die ähnlich wie ihre elektronischen Gegenstücke Informationen verarbeiten können. Die Mikrostrahlen der französischen Wissenschaftler würden einen sehr eleganten Antrieb für solche »Schaltkreise« abgeben.

Vielleicht eignen sie sich aber auch als flüssige Lichtleiter. Das Laserlicht ist nämlich auf Grund der Totalreflexion im Mikrostrahl gefangen und folgt diesem durch die umgebende Flüssigkeit. Die Perspektiven sind faszinierend: Laserstrahlen könnten ihre eigenen Lichtleiter erzeugen und auf diese Weise beispielsweise mit Flüssigkeitschips integriert werden.

Auch eine andere viel versprechende Anwendung ist denkbar. Bei genauerem Hinsehen zerfällt der Flüssigkeitsstrahl nämlich nach einer Länge von ungefähr einem halben Millimeter in kleine Tropfen. Deren Größe und Abstand lässt sich sehr einfach über die Intensität und den Durchmesser des Laserstrahls steuern. Dies würde die Herstellung von Emulsionen aus kleinen Flüssigkeitstropfen erleichtern, die etwa medizinische Wirkstoffe enthalten könnten. Was auf den ersten Blick eher als Spielerei anmutet – Stichwort: Hightech-Wasserpistole –, könnte also doch einen beachtlichen praktischen Nutzwert haben. ◁

Stefan Maier ist promovierter Physiker und arbeitet am California Institute of Technology in Pasadena.

DIE EXTRASEITE NUR FÜR ABONNENTEN

Als Abonnent von SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT kennen Sie bereits die Vorzüge unseres Magazins, doch seit Februar gibt es noch einen weiteren Zusatznutzen für Sie:

WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE

NUR HIER **EXKLUSIVE ONLINE-ARTIKEL**

+ finden Sie jeden Monat einen Online-Artikel aus der spannenden Welt der Wissenschaft, der nicht im Spektrum-Monatsheft publiziert wurde.

NUR HIER **EXKLUSIVE PRODUKTE**

+ gibt es extra für unsere Monatsheft-Abonnenten Spiele und Produkte mit Pfiff wie den Heronsring.

Und ab Oktober gibt es noch einen EXTRABONUS: den SPEKTRUM-PLUS-VERGÜNSTIGUNGSAUSWEIS

NUR HIER **EXKLUSIV: ONLINE-ARCHIV**

+ stehen Ihnen im Online-Archiv alle Artikel von SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT seit 1993 im Volltext zur Verfügung.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Spektrum Plus Mitgliedsausweis

Spektrum der Wissenschaft
Slevogtstr. 3 – 5
69126 Heidelberg
Tel. 06221 – 91 25 743
marketing@spektrum.com

Jubiläumsaktion für Abonnenten: 25 Jahre Spektrum der Wissenschaft von 1. Oktober 2003 bis 30. September 2004. Das aktuelle Angebot entnehmen Sie bitte dem Internet: www.spektrum-plus.de

Name
Kundennummer
ID

Der Ausweis ist nur in Verbindung mit dem Personalausweis gültig.

EXKLUSIV FÜR ABONNENTEN

Für Abonnenten von SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT ist vom 1. Oktober 2003 bis zum 30. September 2004 die spannende Welt der Wissenschaft noch attraktiver! Denn unter **www.spektrum-plus.de** können Sie sich mit Ihrer Abonnentennummer einen Zugangspass ausdrucken, mit dem Sie bei folgenden Museen, Filmtheatern und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhalten:
Deutsches Museum, Bonn / Botanischer Garten, Jena / Industriemuseum, Chemnitz / Deutsches Lokomotiv-Museum-Neuenmarkt, Kulmbach / Mathematikum, Gießen / Neanderthal Museum, Mettmann / Discovery-Channel IMAX-Theater, Berlin / Naturhistorisches Museum und Landessammlung für Naturkunde, Mainz / Universum Science Center, Bremen / Deutsches Erdölmuseum, Wietze / Landesmuseum für Vorgeschichte, Dresden / Museum für Naturkunde, Berlin / Auto & Technik Museum, Sinsheim / Technik Museum, Speyer / IMAX DOME Filmtheater, Speyer / IMAX Classic Filmtheater, Speyer

Schauen Sie doch einfach einmal auf unserer SPEKTRUM-PLUS-Seite im Internet, was Sie erwartet.

BESTELLUNG FÜR ABONNENTEN UNTER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE ODER PER E-MAIL: MARKETING@SPEKTRUM.COM, UNTER ANGABE DER KUNDENNUMMER DES SPEKTRUM-ABOS.

DIE WERTANLAGE MIT DEN BESTEN ZINSEN:

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT bietet Ihnen die aktuellsten Nachrichten aus der spannenden Welt von Forschung und Wissenschaft.

WISSEN

ABONNIEREN ODER VERSCHENKEN SIE SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT UND PROFITIEREN SIE VON DEN VORTEILEN EINES ABONNEMENTS:

+ monatlicher Sonderpreis Inland von € 6,30 (statt € 6,90)
+ Schüler und Studenten auf Nachweis sogar nur € 5,45
+ Anlieferung frei Haus noch vor Verkauf im Handel
+ www.spektrum-plus.de: Die exklusive Internetseite nur für Abonnenten
  - Online-Archiv mit freiem Zugang zu allen SPEKTRUM-Monatsheften seit 1993 im Volltext
  - jeden Monat mit einem bisher nicht in SPEKTRUM erschienenen Online-Artikel

NEU ▶▶ – SPEKTRUM-PLUS-Zugangspass mit vielen Vergünstigungen in ausgesuchten Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen

Verschenken oder abonnieren Sie SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT und wir bedanken uns mit dem T-Shirt »Pioneer«.

ODER WERBEN SIE EINEN NEUEN JAHRESABONNENTEN UND WÄHLEN SIE EINE DER FOLGENDEN PRÄMIEN AUS:

STIFTHALTER »Weltkugel«

Bei dem dekorativen Stifthalter sitzt eine Weltkugel direkt auf dem Rücken einer mittels modernster Lasertechnik in einen Plexiglaswürfel eingebrannten menschlichen Figur. Die Kugel selbst kann separat vom Stifthalter genommen werden. Maße: 80 × 50 × 50 mm; Lieferung ohne Stift.

BUCH »Farben«

In dem Buch werden in ca. 130 abgeschlossenen Aufsätzen kunsthistorische Aspekte ebenso behandelt wie die Chemie der Farbstoffe und Färbeverfahren, die Biologie des Sehsystems und der Farbwahrnehmung oder physikalische Grundlagen und technische Anwendungen; 420 S. mit zahlreichen Abbildungen.

UNIVERSALGUTSCHEIN
BestChoice über € 30,–

Der Universalgutschein ist unbefristet und unkompliziert per Internet, Fax, Post oder Anruf abzurufen und kann in bis zu sechs Einkaufsgutscheine (zu je mind. 5 €) gestückelt werden. Einlösbar ist er bei mehr als 40, im Internet sogar mehr als 100 Anbietern: u. a. bei Amazon, CINEMAXX, Douglas, IKEA, Kaufhof, OBI und WOM. Der Umtausch gegen Bargeld ist ausgeschlossen.

SPIEL »Wer wird Millionär?« 2. Edition

Das erfolgreiche Quiz-Spiel bietet Ihnen neue spannende Fragen mit steigendem Anspruch.

ORDERN SIE NOCH JETZT SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT UND SICHERN SIE SICH IHREN WISSENSVORSPRUNG!

EINE BESTELLMÖGLICHKEIT FINDEN SIE AUF NEBENSTEHENDEM BEIHEFTER ODER UNTER

WWW.SPEKTRUM.DE

ALLE PREISE VERSTEHEN SICH INKL. UMSATZSTEUER.

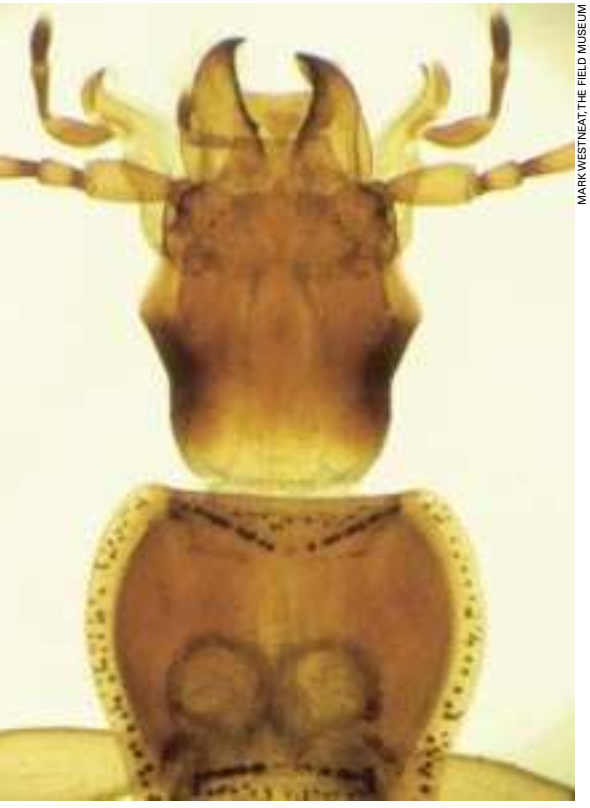
ZOOLOGIE

Aktive Atmung bei Insekten

Nach bisheriger Meinung werden Insekten über ein verzweigtes Röhrensystem rein passiv mit Sauerstoff versorgt. Doch nun zeigten Untersuchungen mit einem leistungsfähigen Röntgenmikroskop, dass die vermeintlich starren Röhren rhythmisch pulsieren können.

Von Nardine Löser

Letztlich war es Zufall. Für gewöhnlich erkundet Wah-Keat Lee die Struktur unbelebter Materie. Nur aus einer Laune heraus hatte er eine Ameise unter sein spezielles Röntgenmikroskop gelegt – und war hellauf begeistert: Die Aufnahmen, die der Synchrotron-Teilchenbeschleuniger lieferte, zeigten detailgetreu das Innenleben des Tieres. Die »Advanced Photon Source« (APS) des Argonne-Nationallaboratoriums bei Chicago (Illinois) beschleunigt Elektronen auf einem 1104 Meter langen Rundkurs fast auf Lichtgeschwindigkeit. Dabei geben die Teilchen, die zusätzlich zu einer Slalombewegung gezwungen werden, intensive Röntgenstrahlung ab, die so stark gebündelt ist, dass sie sich auf sehr kleine Objekte fokussieren lässt – so zum Beispiel auf die inneren Organe von Insekten.



MARK WESTNEAT, THE FIELD MUSEUM

Der Laufkäfer *Platynus decentis* gehörte zu den Insekten, bei denen jetzt eine aktive Atmung entdeckt wurde. Auf dieser mikroskopischen Aufnahme des Kopfbereichs, für die das tote Tier durch Behandlung mit Kalilauge entfärbt und durchscheinend gemacht wurde, sind die längs verlaufenden Atmungsröhren (Tracheen) im Inneren ganz zart als helle Schläuche zu erkennen.

Doch mit der Anatomie von Tieren kannte sich der Physiker nicht aus. Deshalb wandte er sich an Mark Westneat, Kurator am Field Museum of Natural History in Chicago. Gemeinsam erkannten sie die enormen Möglichkeiten der neuen Untersuchungsmethode. Und so trommelten sie eine Mannschaft aus Biomechanikern und Zoologen zusammen, die sich nun schon seit zwei Jahren einem faszinierenden Thema widmet: der Atmung der Insekten. Dabei entdeckte die Truppe, dass die Tiere noch auf ganz andere Art Luft holen können als bisher gedacht *(Science, Bd. 299, S. 558)*.

Nur starre Röhren zum Luftholen?

In allen einschlägigen Lehrbüchern steht, dass hohle Röhren die Sauerstoffversorgung der Insekten gewährleisten. Diese so genannten Tracheen beginnen an der Körperoberfläche mit verschließbaren Atemöffnungen und durchziehen von dort aus den gesamten Organismus. Dabei werden die Äste immer feiner. Besonders stark verzweigen sie sich an Stellen hohen Sauerstoffbedarfs – so an den Flugmuskeln und im Kopfbereich. Der Gastransport erfolgt durch passive und damit recht langsame Diffusionsprozesse. Dabei entscheidet das Druckgefälle zwischen Körpergewebe und feinster Tracheen-Endzelle (Tracheole) darüber, wie viel Atemgas übertritt.

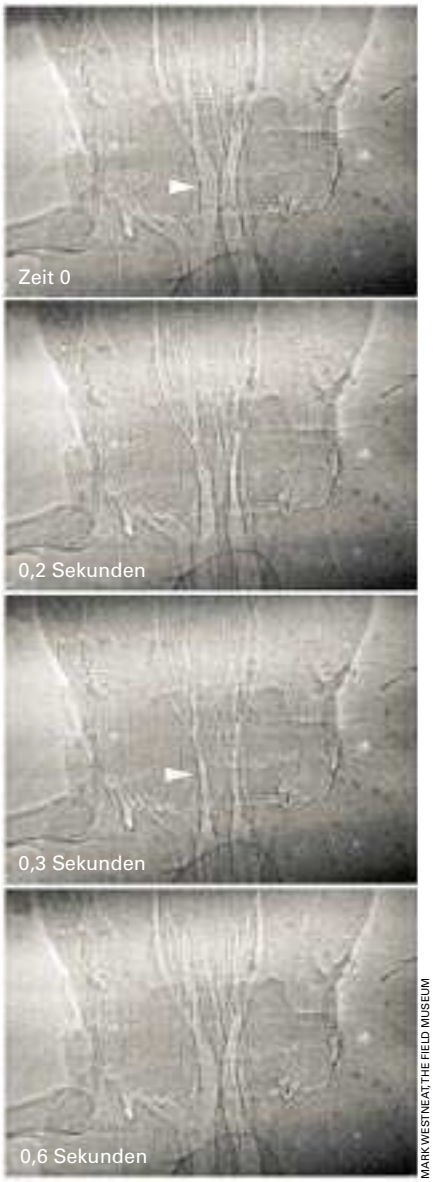
Ein zentrales Organ zur Steigerung des Sauerstofftransports an die Gasaustauschfläche und des Abtransports von Kohlendioxid – analog zur menschlichen Lunge – hatte man bei Insekten bisher nicht gefunden. Nur eine »intermittierende Atmung« durch Veränderung der Körperform war als unterstützende Maßnahme bekannt. Beispielsweise flachen Käfer sowie Lang- und Kurzfühlerschrecken bei hohem Sauerstoffbedarf ihren Körper ab, während Zweiflügler und Hautflügler ihr Hinterteil teleskopartig verkürzen. Diese Bewegungen lassen den Blutdruck ansteigen, was die Tracheen zusammendrückt und die mit Kohlendioxid angereicherte Luft herauspresst (Exspiration).

Das anschließende Einatmen (Inspiration) geschieht passiv: Die Röhren dehnen sich wegen der Elastizität ihrer Wände wieder aus und saugen dabei Luft ein. Zwar ähneln diese im Hinterleib stattfindenden Bewegungen einer aktiven Atmung, aber als Organ, das wie unsere Lunge ein Leben lang rhythmisch Luft pumpt, schien das Tracheensystem nicht zu funktionieren.

Doch jetzt sind sich die Insektenforscher nicht mehr sicher. Als das Team um Lee und Westneat lebende Insekten mit Röntgenstrahlung der Advanced Photon Source durchleuchtete, machte es eine erstaunliche Entdeckung. Die erhaltenen Echtzeitfilme zeigten, dass die Tracheen auch im Vorderkörper, speziell im sehr starren Kopf und im ersten Brustsegment (Prothorax), pulsieren können. Sogar verzweigte Röhren höherer Ordnung wurden dabei in rascher Folge aktiv zusammengezogen und wieder gedehnt. Wie sich bei insgesamt zwölf Zweiflügler-Arten nachweisen ließ, tritt diese Atmung unabhängig von Körperbewegungen auf.

Bei drei der zwölf Spezies – Laufkäfer *(Platynus decentis)*, Riesenameise *(Camponotus pennsylvanicus)* und Heimchen *(Achaeta domesticus)* – führten die Forscher eine genaue Analyse des Respirationszyklus von einer Ausatmung zur nächsten durch. Die gemessenen Atemfrequenzen variierten zwischen 0,7 Hertz beim Laufkäfer und 0,4 Hertz bei der Ameise. Dabei dürfte es sich um Maximalwerte handeln, da die intensive Strahlung und starke Wärmeentwicklung während der Untersuchung eine hohe Belastung für die Tiere bedeutete.

Noch ist allerdings unklar, welcher Motor die rhythmische Atembewegung antreibt. Nach Meinung des Entomologen Oliver Betz, des einzigen Deutschen im Team, könnten spezielle Muskelgrup-



MARK WESTNEAT, THE FIELD MUSEUM

In dieser Bildserie vom Kopf- und Brustbereich eines Laufkäfers, die mit Synchrotron-Röntgenstrahlung aufgenommen wurde, sieht man deutlich, wie sich die Tracheen zusammenziehen und wieder ausdehnen (weißer Keil).

pen die einheitliche Bewegung im Vorderkörper erzeugen. Aber auch ein bislang unentdecktes Organ, das die Pulsation steuert, ist nicht auszuschließen.

Eroberung des Festlands dank besserer Sauerstoffversorgung

In jedem Fall scheint die Atmung ähnlich effizient wie beim Menschen zu sein. So ergaben Berechnungen, welche die Forscher anhand der beobachteten Inspirations- und Exspirationsvorgänge anstellten, dass sowohl das Verhältnis des ausgetauschten zum gesamten Gasvolumen in den Tracheen als auch die Geschwindigkeit dieses Austausches ähnlich hoch ist wie bei einer Person, die leichte sportliche Übungen verrichtet. Demnächst geplante Experimente, bei denen während der Beobachtung im Röntgenmikroskop die Menge an einströmendem Sauerstoff und ausströmendem Kohlendioxid gemessen wird, sollen konkrete Daten dazu liefern.

Schon jetzt lässt sich sagen, dass die aktive tracheale Atmung von großer Bedeutung für die Evolution der Insekten gewesen sein muss. Erst sie dürfte besondere Leistungen wie schnelles Laufen oder Fliegen ermöglicht haben. »Zugleich war sie wohl eine Grundvoraussetzung für komplexe Sinnesfunktionen, die eine gute Sauerstoffversorgung des Gehirns erforderten«, vermutet Betz. Auch eine bessere Versorgung des Komplexauges und der Mundwerkzeuge könnte entscheidend zum Siegeszug landbewohnender Insekten beigetragen haben.

Je nachdem, wie verbreitet der neue Atemmechanismus ist und wie sein Motor aussieht, eignet er sich vielleicht auch als systematisches Merkmal, das den Stammbaum der Insekten genauer klären hilft. Bis heute streiten sich Entomologen sowohl über einzelne Zweige als auch über das Wurzelsystem der Klasse Insecta. Erst vor kurzem weckten Ergebnisse einer neuen DNA-Analyse sogar Zweifel, ob die Sechsbeinigkeit wirklich, wie bisher gedacht, ein charakteristisches Unterscheidungsmerkmal dieser riesigen Tiergruppe ist. Demnach schlugen die als Urinsekten geltenden Springschwänze schon lange, bevor sich im Stammbaum der Gliederfüßer die Insekten beispielsweise von den Krustentieren trennten, unabhängig einen Weg auf sechs Beinen ein *(Science, Bd. 299, S. 1887)*.

Das Argonne-Team erwartet, in fünf bis maximal zehn Jahren Klarheit über die phylogenetische Bedeutung des Motors der Pulsationen gewonnen zu haben. Zunächst aber konzentriert es sich auf die Verbesserung der Röntgenmethode. Vor allem die Überlebenszeit der durchleuchteten Tiere soll verlängert werden; denn noch halten die Winzlinge wegen der Hitze nur etwa 15 Minuten durch. ◁

Nardine Löser ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

Gemeinsame Leserreise von „Spektrum der Wissenschaft“ und „wissenschaft-online“ (November 2003)

Costa Rica
Tropenwaldreise

Naturkundliche Entdeckungsreise mit Badeaufenthalt

Tropenvielfalt erleben im Regenwald

In Zusammenarbeit mit unserem Partner Waschbär-Reisen ist eine Leserreise für „Spektrum der Wissenschaft“ und „wissenschaft-online“ entstanden, deren Motto lautet:

Sehen – Erleben – Verstehen – Erhalten!

Das erwartet Sie auf dieser Reise:

- **Durchbrechen Sie das Zeitfenster** (Nacht- und Dämmerungsexkursionen)
- **Überwinden von Sichtbarrieren** (Übergang vom Boden- zum Baumkronenkosmos u. a. beim Canopy-Walk in Sta. Elena)
- **Wald-Architektur – wenn Bäume in den Himmel wachsen** (Staunen über Brett-, Stelz-und Luftwurzeln)
- **Gerüche – Aphrodisiaka der besonderen Art** (Blumen- und Fruchtdüfte)
- **Farben – Lippenstifte der Natur** (von der Interaktion Pflanze – Tier, u. a. Kolibri–Blumen)
- **Hörwelten – Kommunikationschaos zwischen Infra- und Ultraschall** (von Klopfkäfern und Fledermäusen)
- **Inventur der Artenvielfalt – La Selva:** Neuzeitliche Entdeckungsreisende (zu Gast bei Biologen und Pharmazeuten)
- **Prioritäten des modernen Umwelt- und Naturschutzes**

Haben wir Sie neugierig gemacht?

Fordern Sie noch heute die ausführlichen Reiseunterlagen an:

Tel.: 06221/9126-743

Fax: 06221/9126-751

E-Mail: marketing@spektrum.com

Oder informieren Sie sich ausführlich im Internet unter www.wissenschaft-online.de/reisen

Spektrum DER WISSENSCHAFT

wissenschaft-online

ALTERTUMSFORSCHUNG

Troia – umkämpfter Wächter über die Dardanellen

Ein alter Brief in neuer Interpretation wirft ein überraschendes Licht auf die realen Hintergründe der Berichte in Homers »Ilias«.

Von Klaus-Dieter Linsmeier

Eine gefährliche Liebschaft bildet den Hintergrund der Ilias Homers: Paris raubt Helena und löst damit den Troianischen Krieg aus. Nun mögen schöne Frauen gelegentlich Anlass gewalttätiger Auseinandersetzungen gewesen sein, doch Kriege hatten meist handfestere Ursachen. So dürften auch hinter dem Untergang des historischen Troia um 1180 v. Chr. in Wahrheit schlicht wirtschaftliche Gründe stecken. Das und anderes mehr lässt sich jedenfalls einem tönernen Keilschriftbrief entnehmen, der vor kurzem neu interpretiert wurde.

Diese Tontafel (unter der Nummer KUB 26.91 registriert) war 1906/07 in der ehemaligen hethitischen Hauptstadt Hattusa (heute Boğazköy, etwa 130 Kilometer östlich von Ankara) ausgegraben und 1928 von dem Schweizer Altorientalisten Emil Forrer übersetzt und publiziert worden. Sie gehörte offenbar zur Korrespondenz zwischen dem hethitischen Großkönig und dem Herrscher von Achijawa, einem griechischen Reich, das Forrer vier Jahre zuvor im Archiv Hattusas erstmals aufgefallen war.

Der Altanatolist Frank Starke von der Universität Tübingen, der den Brief nun neu bearbeitet hat, datiert ihn anhand paläographischer Merkmale auf die Mitte des 13. Jahrhunderts vor Christus. In jener Zeit erstreckte sich das Reich der Hethiter, Einflussgebiete und Vasallenstaaten mitgezählt, von der kleinasiatischen Ägäisküste bis nach Nordmesopotamien und Nordsyrien (Karte auf Seite 24/25). Lediglich um Milet hielt sich ein Territorium achijawischer Kultur.

Offenbar standen die Korrespondierenden schon seit längerem in Kontakt, denn Bezugnahmen auf frühere Schreiben belegen, dass der Brief Teil eines Schriftwechsels war. Die Anrede des Adressaten als »mein Bruder« bedeutete im diplomatischen Vokabular jener Zeit: Hier kommunizierte Großkönig mit Großkönig. Das Besondere des neu bearbeiteten Briefes aber ist: Starke schloss aus Eigentümlichkeiten des Stils, dass weder Hethitisch noch das im westlichen Kleinasien verbreitete Luwische die Muttersprache des für den Absender tätigen Schreibers gewesen war. Anders als vor ihm Forrer kommt der Tübinger Forscher deshalb zu dem Schluss, dieser Brief sei von Achijawa nach Hattusa, nicht umgekehrt, geschickt worden.

Dies ist eine kleine wissenschaftliche Sensation; denn bislang gab es kein Keilschrift-Dokument des Reiches Achijawa, also keinen Brief von West nach Ost. So vermittelt dieses Schreiben einen Einblick in die politische Welt des 13. Jahrhunderts vor Christus, in der Hethitisch und Luwisch die gebräuchlichen Diplomatensprachen waren und die Keilschrift so selbstverständlich benutzt wurde, dass auch die Griechen, ja sogar die Pharaonen Ägyptens ihre internationale Korrespondenz darin abfassen ließen.

Schreibfehler verbarg wahre Bedeutung

Spannender noch ist, dass Starke – im Verein mit anderen Forschern, die sich seiner Deutung anschließen – nunmehr sicher ist, Achijawa genau lokalisieren zu können. Forrer hatte schon 1924 den Verdacht geäußert, dieses Reich sei identisch mit dem Land der Achaier, wie Homer die aus Griechenland kommenden Gegner Troias bezeichnet hatte. Dieser Vermutung widersprach der Indogermanist Ferdinand Sommer 1932 jedoch derart vehement, dass er Forrers wissenschaftlichen Ruf vernichtete und dessen These bis Anfang der 1980er Jahre in Verruf brachte. Seitdem ist die Liste der Indizien für eine solche Identifikation und damit die Zahl der Befürworter von Forrers These freilich ständig gewachsen.

Starkes Neuinterpretation des Briefes liefert nun den letzten Beweis. Dass der Schreiber offenbar nicht in Kleinasien beheimatet war, stützt bereits die These von der Lokalisierung auf dem griechischen Festland. Vor allem aber: Der Brief

KLAUS-DIETER LINSMEIER

Steinstelen am Südtor (links) des Troia der späten Bronzezeit belegen die Zugehörigkeit zum hethitischen Kulturkreis – Steine galten dort als Wohnsitz von Göttern und Geistern. Lange wurde die Eckbastion Troia VI (1700 – 1300 v. Chr.) zugeordnet, aber neuere Datierungen verweisen auf Troia VIIa (1300 – 1180 v. Chr.). Es war damit mächtiger als bisher gedacht und könnte Homers »Ilion« sein.

erwähnt einen Vorfahren des Absenders namens KA GA MU. Diese drei Silbenzeichen ließen den Altanatolisten aufmerken, denn den Regeln des Hethitischen hätte allenfalls ein KA GA MU WA entsprochen.

Deshalb unterstellt Starke dem – wohlgemerkt nicht muttersprachlichen – Schreiber einen kleinen Fehler: Dieser vergaß, einen weiteren Keil, also einen einzelnen senkrechten Endstrich, zu setzen. Die Korrektur macht aus GA ein TA, wobei in der hethitischen Keilschrift »T« für »D« steht. Damit liest sich der Name orthografisch korrekt als KA TA MU beziehungsweise »Kadmos« (die griechische Endung »os« erscheint im Hethitischen als »u«). Kadmos aber war der mythische Gründer Thebens.

Bedenkt man ferner den offenkundig hohen Rang des Absenders, legt dieser Befund nahe, dass das in Mittelgriechenland gelegene Theben, nicht Mykene, im 13. Jahrhundert vor Christus das Zentrum der Macht in Griechenland war. Dem entspricht auch ein Archiv griechisch-mykenischer Tontäfelchen in Linear-B-Schrift, das 1993 bei Bauarbeiten im modernen Theben entdeckt wurde – ▷

Im 13. Jahrhundert vor Christus beherrschten drei Machtblöcke den östlichen Mittelmeerraum: das Hethiterreich mit etlichen Gliedstaaten (braun), der mykenische Kulturkreis (grün) und das pharaonische Ägypten (lila). Vor allem zwischen den ersten beiden gab es offenbar mehrfach Spannungen, nicht zuletzt um die Kontrolle der Dardanellen durch Troia/Wilusa.

▷ Dokumente, die diese Stadt in der Bronzezeit als zumindest territorial bedeutendes Königreich mit Verbindungen bis zum kleinasiatischen Milet ausweisen.

Damit werden auch manche Eigentümlichkeiten der Ilias verständlich. Zum Beispiel rätselten die Homer-Forscher lange über die Liste der griechischen Länder, die Schiffe für den Krieg gegen Troia entsandten. An erster Stelle steht nämlich nicht die Heimat des Heerführers Agamemnon, Herrscher der mykenischen Residenz Argos auf dem Peloponnes und Schwager der geraubten Helena. Den »Schiffskatalog« führt vielmehr Böotien an, dessen Hauptstadt Theben war; von seinem Hafen Aulis aus stachen die 1186 Schiffe in See.

Doch noch mehr verrät der Brief des Herrschers von Achijawa (oder Achaia): Dieser zeigt sich vertraut mit Vorgängen im Einflussbereich der Hethiter, die 150 Jahre zurücklagen. Offenbar hatten also schon damals diplomatische Kontakte bestanden. Aber nun, im 13. Jahrhundert vor Christus, ist das diplomatische Klima zwischen den Machtblöcken deutlich abgekühlt, ja das Wort Feindschaft fällt.

Streit um strategisch wichtige Inseln

Der Grieche bezieht sich auf ein früheres Schreiben des hethitischen Kollegen, vermutlich Hattusili II. (er herrschte etwa 1265 – 1240 v. Chr.). Dieser beanspruchte offenbar drei Inseln für sein Reich; der Herrscher von Achijawa lehnt das aber ab. Er beruft sich auf Rechte, die jener Kadmos durch Verheiratung einer Tochter mit dem König des Reiches Assuwa, damals Besitzer der Inseln, erworben habe. Dieses Assuwa ist nach heutigem Wissen ein Vorläuferstaat von Troia (bei Homer auch »Ilion« genannt), das mit dem in Keilschrifttexten erwähnten »Wilusa«, Mitglied des föderal organisierten hethitischen Großreichs, identifiziert wird (Spektrum der Wissenschaft 7/2000, S. 64).

Hält man sich die strategisch günstige Lage an den Dardanellen vor Augen – Troia erlangte Reichtum, weil Schiffe an seinen Gestaden auf günstigen Wind warten mussten –, deutet dieser Brief einen handfesten Konflikt zwischen den Machtblöcken an. Die Passage durch die Meerenge ermöglichte den Zugang nach Thrakien und zur Donauregion beziehungsweise zum Schwarzen Meer. Die umstrittenen Inseln – vermutlich Imbros (Gökçeada), Lemnos und Samothrake – boten eine Kontrolle der Zufahrt von Westen her. Wären sie Hattusa zugesprochen worden – oder näher liegend dessen potentem Vasallen Troia/Wilusa –, wäre ein Durchfahren der Dardanellen für Gegner des hethitischen Reiches schwer möglich geworden. Jüngste Grabungen auf Lemnos und Imbros brachten tatsächlich mykenische Funde ans Licht, möglicherweise das archäologische Pendant zum Schriftwechsel.

Mag Helena auch die schönste Frau ihrer Zeit gewesen sein – falls es einen oder mehrere Kriege um das historisch belegte Troia gegeben hat, wurden sie wohl um profane Dinge wie Wegerechte geführt. Ein Kandidat ist die als Troia VIIa (etwa 1300 – 1180 v. Chr.) bezeichnete Siedlungschicht. Bis vor kurzem galt sie noch als unbedeutend im Vergleich zum spätbronzezeitlichen Troia VI, das ein Erdbeben um 1300 v. Chr. zerstört hatte. Doch die Neudatierung einiger dieser Siedlungsschicht zugeschriebener mächtiger Türme und Bastionen – zum Beispiel anhand von Keramikscherben im Füllmaterial – sowie eine Neuinterpretation verschiedener Gebäude im Palastbereich als Lagerhäuser durch den Tübinger Archäologen Ralf Becks haben dieses Bild verändert: Troia VIIa war ein weithin sichtbares Monument der Macht, größer noch als sein Vorgänger. Deshalb nimmt es nicht wunder, dass Hattusa daran interessiert war, das kleine Reich mit der günstigen Lage an den Dardanellen um 1300 v. Chr. formal durch einen Staatsvertrag (bekannt als Alaksandu-Vertrag) in seine Förderation aufzunehmen.

Umgekehrt bedeutete das natürlich auch Waffenhilfe für Troia/Wilusa, und die war bitter nötig. Allerdings bedrohten nicht die Achijawer selbst die Stadt, sondern sozusagen stellvertretend ein Heerführer namens Pijamaradu. Der entstammte der Dynastie eines besiegten Erzfeindes der Hethiter in Westkleinasien, dem Herrscher von Arzawa. Nicht nur hatte Achijawa diesem und seiner Familie Asyl gewährt, es duldete auch, dass Pijamaradu ab etwa 1290 v. Chr. von Milet aus – dem Brückenkopf Achijawas in Kleinasien – Staaten an der Küste, darunter auch Wilusa, attackierte.

Ein Pirat als Schachfigur

Dieser Freibeuter war Gegenstand eines wohl ebenfalls um 1250 v. Chr. verfassten Schreibens. In diesem so genannten Tawaglawa-Brief an den König von Achijawa bestätigt Hattusili II. zwar, die Feindschaft um Troia sei beigelegt, doch warnt er auch: »Ein Krieg wäre nicht gut für uns.« Und er fordert den Griechen definitiv auf, den Heerführer Pijamaradu auszuliefern oder ruhig zu stellen.

Welcher Brief der ältere ist, weiß man noch nicht. Der Gräzist und Homer-Forscher Joachim Latacz von der Universität Basel betont, die Schreiben zeigten bisher lediglich zwei Streitpunkte zwischen den beiden Großmächten des 13. Jahrhunderts auf. Doch auch wenn es reine Spekulation ist (der die Minderheit der Gegner eines bronzezeitlichen Machtzentrums Troia heftig widersprechen dürfte): Sofern beide Briefe tatsächlich etwa zeitgleich entstanden sind, liegt der Verdacht nahe, dass Wilusa mit Rückendeckung Hattusas danach strebte, seinen Einfluss auf die drei Inseln westlich der Dardanellen auszudehnen. Pijamaradu oder eine Streitmacht der Achijawer stoppten diese Expansion, und die Diplomaten beider Seiten hatten ihre große Stunde.

Ob der König von Achijawa dem marodierenden Heerführer schließlich die Unterstützung entzog, um Hattusa entgegenzukommen, ist nicht bekannt. Am Ende verloren alle Beteiligten, und die Geschichte rollte über die Großmächte und ihre Verbündeten hinweg: Um 1200 v. Chr. vergingen die Paläste der mykenisch/achijawischen Kultur im Feuer, und in Griechenland begann das »Dunkle Zeitalter« (Spektrum der Wissenschaft Spezial 2/2003, S. 24); auch die Städte der hethitischen Gliedstaaten an der kleinasiatischen Küste brannten. Ägyptische Berichte machten aggressive »Seevölker« dafür verantwortlich, doch deren Identität ist bislang ungeklärt. Etwa zur gleichen Zeit zerfiel das hethitische Großreich wegen innerer Machtkämpfe der Königsfamilie; Hattusa wurde verlassen.

Troia VIIa endete um 1180 v. Chr., den archäologischen Funden nach durch eine militärische Niederlage; um 1000 v. Chr. verlieren sich die letzten Besiedlungsspuren. Es sollte gut 200 Jahre dauern, bis griechische Kolonisten den Ort wieder nutzten. Einer von ihnen, der Dichter Homer (etwa 770 – 700 v. Chr.), verknüpfte Mythen und Legenden mit dem Eindruck der mächtigen Ruinen und schuf so das erste literarische Werk des Abendlandes.

Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Mit Zufall und Statistik zum Ziel

Physikalische Forschung schreitet nicht immer geradlinig voran. Das beste Beispiel bieten Systeme, deren Eigenschaften sich schlagartig ändern, wenn man winzige Störungen verursacht. Für ihre Beschreibung sind neuartige Modelle vonnöten, die auf statistische Konzepte zurückgreifen.

Von Étienne Guyon

Kritische Phänomene sind in der Physik allgegenwärtig – auch im Alltag. Man braucht beispielsweise nur Sand auf einen Haufen rieseln zu lassen oder Wasser zum Kochen zu bringen: Beim Erreichen des kritischen Punktes kann bereits ein zusätzliches Sandkorn eine Lawine auslösen; im kochenden Wasser existieren an der kritischen Temperatur die flüssige und die gasförmige Phase nebeneinander; sie stimmen in all ihren Eigenschaften überein und sind nicht zu unterscheiden.

Für den Theoretiker stellen solche Phänomene eine große Herausforderung dar. Erste Arbeiten hierzu stammen von dem niederländischen Physiker Johannes van der Waals, der in den 1870er Jahren den kritischen Punkt einer Flüssigkeit untersuchte, sowie von seinem französischen Kollegen Pierre Curie, der 1894 die Temperaturabhängigkeit des Diamagnetismus entdeckte. Als Kenneth G. Wilson 1971 ein mathematisches Rezept fand, mit dem sich derart unterschiedliche kritische Phänomene wie kochendes Wasser, die Magnetisierung oder die Kräfte zwischen den fundamentalen Bausteinen der Materie, den Quarks, beschreiben lassen, löste dies in der Wissenschaft eine kleine Revolution aus (wofür Wilson 1982 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde). Sich auf diese Universalität berufend, fassen Physiker nun die unterschiedlichsten Vorgänge, die in der Nähe eines kritischen Punktes zu beobachten sind, in einer einheitlichen Beschreibung zusammen. Mit einer Erweiterung dieses neuartigen Ansatzes gelang es dem französischen Physiker Pierre-Gilles de Gennes, in flüssigen Kristallen und Polymerlösungen Phasenübergänge zu beschreiben. Der Bedeutung seiner Arbeit gemäß wurde auch er – 1991 – mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet.

Vor rund 25 Jahren begann eine Gruppe von Festkörperphysikern um de Gennes, die Methoden der statistischen Physik, die für atomare Systeme entwickelt worden waren, auch auf solche Systeme anzuwenden, deren Teilchen deutlich größer als einzelne Atome sind – so genannte Cluster. Diese Gebilde können aus Hunderten bis Zehntausenden von Atomen zusammengesetzt sein. Bei solchen makroskopischen stochastischen Systemen kann es sich beispielsweise um ein Gemisch von leitenden und isolierenden Körnern handeln, das oberhalb einer kritischen Metallkonzentration elektrisch leitend wird. Ein weiteres Beispiel ist das Verhalten eines porösen Mediums, das oberhalb eines kritischen Druckes von einer Flüssigkeit durchdrungen, aber nicht durchnässt wird. Oder eine Lösung aus Polymeren, die oberhalb einer kritischen Konzentration von Molekülen, welche die Polymere miteinander vernetzen, zu einem deutlich festeren Stoff wird, einem so genannten Gel.

Wenngleich diesen Beispielen unterschiedliche Phänomene zu Grunde liegen, können sie mithilfe ein und desselben Modells – nämlich dem der Perkolation – zu einer Typenklasse zusammengefasst werden.

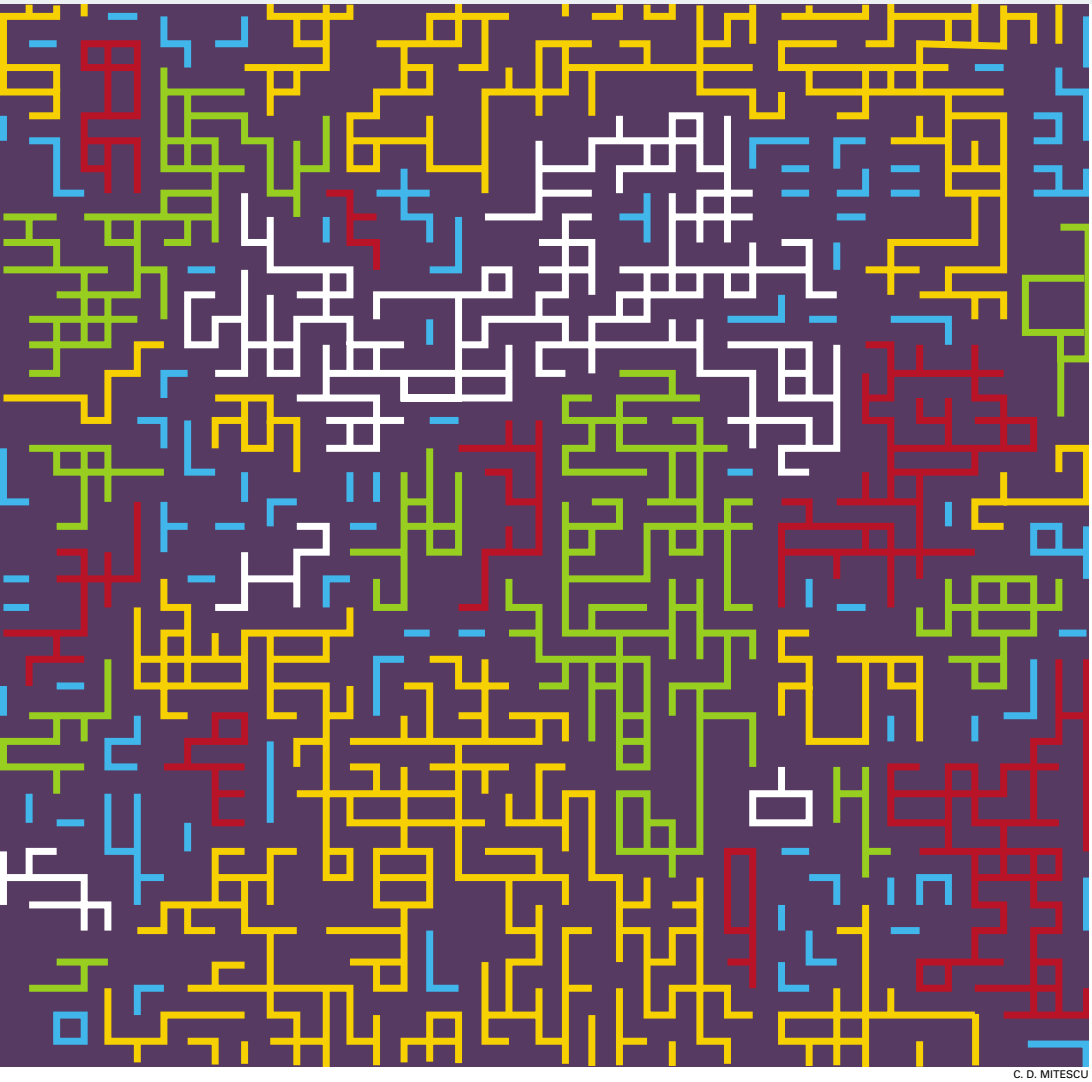
SERIE

25 Jahre Spektrum DER WISSENSCHAFT

In dieser 12-teiligen Serie berichten prominente Forscher aus ihrem Fachgebiet über wissenschaftliche Highlights der letzten 25 Jahre, die aktuelle Situation und künftige Perspektiven.

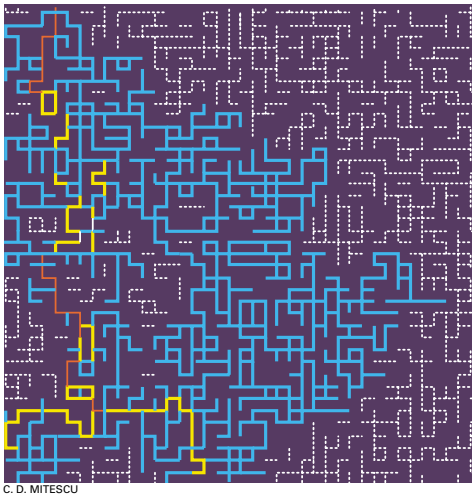
Teil I: Paläoanthropologie
Teil II: String-Physik
Teil III: Gehirnforschung
Teil IV: Klimaforschung
Teil V: Mathematisches Denken
Teil VI: Ultrakalte Atome
Teil VII: Die Chemie beherrschen
Teil VIII: Entzifferung des Genoms
Teil IX: Informationstheorie
Teil X: Sand und Gele

Im nächsten Heft
Teil XI: Immunsystem



C. D. MITESCU

Ein Perkolationslabyrinth erhält man, indem man innerhalb eines Quadratgitters Verbindungslinien schafft, wobei jede Linie mit der Wahrscheinlichkeit p auftritt. Ist p kleiner als 1/2, entsteht ein Ensemble von kleinen isolierten Clustern (durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet). Erreicht p die Perkolationsschwelle 1/2, entsteht ein einziger so genannter perkolierender Cluster, der sich von einem Ende des Quadratgitters bis zum anderen erstreckt und sich in einem unendlich großen Gitter unendlich weit ausdehnen würde (unten). Mit diesem Modell werden etwa die Eigenschaften eines Gels simuliert: Ein Gel entsteht dann, wenn das durch den perkolierenden Cluster dargestellte Polymernetzwerk die gesamte Lösung durchzieht.



C. D. MITESCU

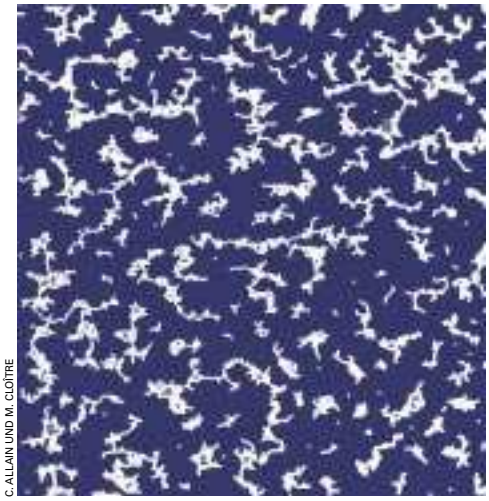
Die Perkolationstheorie bezeichnet eine Klasse von Modellen, bei denen das Zusammenspiel von Geometrie, Topologie und Zufall untersucht werden kann. Der Begriff ist dem lateinischen *percolare* (durchsickern) entlehnt. Das erste Perkolationsmodell führte 1957 der Mathematiker John M. Hammersley ein, und zwar für den Fall eines verstopften Luftfilters, dessen Kanäle nach dem Zufallsprinzip blockiert sind.

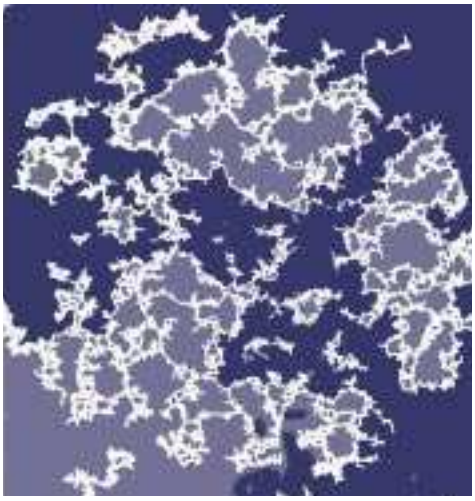
Johannisbeergelee und Clusterphysik

Ein solches Phänomen lässt sich auf dem Computer simulieren. Ausgangspunkt ist ein regelmäßiges Gitter (etwa ein zwischen zwei Elektroden platziertes Gitter aus elektrischen Leitern), bei dem man zufällig Verbindungen durchschneidet. Der noch nicht unterbrochene Gitteranteil (also der perkolierende Cluster) wird zusehends kleiner, bis schließlich eine kritische Konzentration unterbrochener Verbindungen erreicht wird, oberhalb derer nichts mehr »durchsickern« kann. Intakte Verbindungen sind dann nur noch innerhalb kleiner, voneinander getrennter Cluster vorhanden. Wenn man umgekehrt Verbindungen sukzessive aufbaut, versteht man unter der kritischen Konzentration diejenige, ab der das Gitter etwas durchlässt – im genannten Beispiel also Strom zwischen den beiden Elektroden fließt.

Dieses Modell lässt sich auch auf die Bildung von Gelen übertragen (siehe »Gele«, Spektrum der Wissenschaft 3/1981, S. 78). Die einzelnen Molekülketten in einem Polymer werden durch Brücken vernetzt. Steigt deren Anzahl, werden die einzelnen Cluster in der Lösung immer größer. Die Viskosität der Flüssigkeit, des so genannten Sols, nimmt zu, bis die Perkolationsschwelle erreicht ist – hier der Augenblick der Gelierung, bei der sich zum ersten Mal ein großer zusammenhängender Cluster bildet. Hiermit entsteht ein Gel, eine weiche, elastische Masse gerade oberhalb des kritischen Wertes. Aus dem Alltag ist ein einfaches Beispiel vertraut: der Johannisbeergelee, der durch das fruchteigene Pektin geliert.

Ob nun elastische Eigenschaften eines Gels, die elektrische Leitfähigkeit eines Gitters oder die Durchlässigkeit eines Filters: Stets folgt die Abhängigkeit von dem Anteil der Ver- ▷





C. ALLAIN UND M. CLOÎTRE

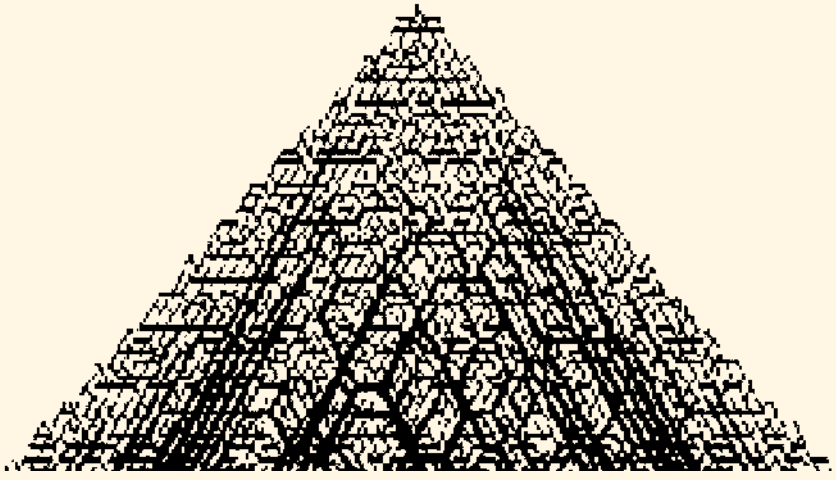
Auf der Wasseroberfläche schwimmende Wachspartikel ziehen sich gegenseitig an und bilden einzelne Cluster, die so lange anwachsen, bis sich an einem kritischen Punkt daraus eine einzige zusammenhängende Struktur bildet. Dieser Wachstumstyp, die Aggregation von Clustern, veranschaulicht annäherungsweise das Phänomen der Gelbildung.

bindungsbrücken oder Durchgangskanäle den gleichen Regeln. Wie die Arbeit von de Gennes zeigt, hilft das Perkolationsmodell auch zu verstehen, wie eine Flüssigkeit unter Druck ein poröses Medium durchdringen kann. Dieser Ansatz ist insbesondere für die Erdölindustrie von Interesse: Im Zuge der Sekundärförderung wird Wasser in die Lagerstätte eingepresst, um das in porösem Gestein gespeicherte Rohöl unter hohem Druck auszuspülen.

Für alle zitierten Beispiele gilt, dass sich die Eigenschaften des gesamten Phänomens nicht durch die Untersuchung lokaler Eigenschaften bestimmen lassen. Nimmt man beispielsweise ein numerisches Modell einer Gitterverbindung, so ist es für die Bestimmung des kritischen Verhaltens unwesentlich, ob das Gitter periodisch ist oder nicht.

Die Allgemeingültigkeit oder Universalität ergibt sich aus dem Umstand, dass das System am kritischen Punkt »selbstähnlich« ist. Das bedeutet, dass sich die Untereinheiten des perkolierenden Clusters nicht von diesem selbst unterscheiden lassen. Das Verhalten an der Perkolationsschwelle (etwa das Elastizitätsverhalten eines Gels) macht deutlich, dass es sich bei dem Perkolationsmodell um ein Fraktal handelt, wie es auch bei anderen kritischen Phänomenen der Thermodynamik – beispielsweise bei der Magnetisierung eines Materials bei Erreichen der Curie-Temperatur – zu beobachten ist.

Die Kraftübertragung in einem Sandhügel haben Hans Jürgen Herrmann, Jan Hemmingsson und Stéphane Roux mit einem zellulären Automaten simuliert. Die Versetzungen in dem aufgeschütteten Sand unterbrechen die Kontinuität des granularen Mediums, sodass an diesen Stellen keine Kraft übertragen wird. Interessanterweise zeigt sich, dass der Druck am Boden im Punkt senkrecht unter dem Gipfel minimal ist.



H. J. HERRMANN, J. HEMMINGSSON, S. ROUX

Perkolationsmodell erweitert Mechanik

Die Physik der Perkolation beziehungsweise die der Fraktale lässt sich auf solche Systeme anwenden, die in der Regel selbstähnlich sind. Diese Bedingung ist in der Praxis natürlich nicht für beliebig viele Größenordnungen erfüllt, sondern vielleicht nur für drei oder vier Zehnerpotenzen der Größenskala. Die Pionierarbeiten von Roland Lenormand in Toulouse über die so genannte Invasionsperkolation eines porösen Mediums waren für die Erdölindustrie besonders interessant. Lenormand, der heute am Französischen Institut für Erdöl arbeitet, hält eine solche Beschreibung inzwischen allerdings selbst für unzureichend, um sämtliche Vorgänge in einem Erdölfeld zu erfassen, da dort die geologischen Bedingungen (wie etwa Erdspalten) über mehrere Größenordnungen doch recht heterogen sind.

Die Theoretiker unterscheiden die zu behandelnden Systeme nach dem Grad ihrer Unordnung. Eine gewöhnliche Legierung beispielsweise weist eine »geringe Unordnung« auf. Das bedeutet, dass sich die Eigenschaften des Gesamtsystems aus einer Mittelung von lokal gemessenen Werten ergeben. Man spricht hier von einer Homogenisierung. Das Konzept der »starken Unordnung« dient hingegen dazu, Systeme in der Umgebung einer Perkolationsschwelle zu beschreiben, wenn gleichzeitig mehrere Größenskalen eine Rolle spielen (wie in einem Bohrkern bei einer Invasionsperkolation). In der Praxis stellt sich allerdings auch das Problem einer »sehr starken

Unordnung«, für das außer einer empirischen Beschreibung bislang noch keine befriedigende Lösung gefunden werden konnte. Die geschilderten Schwierigkeiten scheinen den beträchtlichen numerischen Aufwand in Frage zu stellen, der bislang zur Lösung solcher – nennen wir sie der Einfachheit halber fraktaler – Probleme betrieben wurde. Denn es wurden zwar viele beeindruckende Bilder, aber kaum Lösungsansätze für die existierenden Problemfälle hervorgebracht.

Dennoch sind wir der Ansicht, dass die Anstrengungen der Physiker zu diesem Thema in den letzten 25 Jahren nicht fruchtlos waren. Immerhin wurden klassische Fragestellungen der Physik und der Mechanik neu diskutiert und in ein neues Licht gerückt. Dabei spielt das Konzept der nichtlokalen geometrischen Auswirkungen der Unordnung eine zentrale Rolle.

Diese Aussage können wir am Beispiel eines körnigen Mediums veranschaulichen. Als wir damals mit unserer Forschungsgruppe die Arbeit zu diesem Thema aufnahmen, wollten wir anhand eines Gemisches aus leitenden und isolierenden Körnern eine Perkolation simulieren. Wir sahen uns aber schon bald gezwungen, uns erst mit grundlegenden Problemen des mechanischen Verhaltens solcher Medien auseinander zu setzen. Es wurde klar, dass auch bei solchen Systemen das lokale Verhalten sehr unterschiedlich ist. Die Pionierarbeiten von P. Dantu vom Zentrallaboratorium der Straßenbaubehörde in Paris hatten gezeigt, dass mechanische Spannungen zusammenhängenden Wegen folgen, die jedoch äußerst ungleich über das Granulat verteilt sind. (Ähnliches gilt auch für den Verlauf von Rissen, siehe Grafik links unten.) Da sich seine mechanischen Eigenschaften offensichtlich nicht aus der Kenntnis eines einzelnen durchschnittlichen Kontakts zwischen zwei Körnern herleiten ließen, verallgemeinerten wir die Perkolationstheorie für das mechanische Verhalten des gesamten Granulats.

Warum Dünen wandern

Als Nächstes nahmen sich die Mitglieder unserer Arbeitsgruppe in Paris, Rennes und Marseilles das dynamische Verhalten von Körnern vor. Hier interessierte insbesondere die Dynamik von Lawinen (vergleiche »Selbstorganisierte Kritizität«, Spektrum der Wissenschaft 3/1991, S. 62). Eine Teilgruppe spezialisierte sich dann allmählich auf die Interaktion zwischen Körnern, durch die ein Fluid – eine Flüssigkeit oder ein Gas – strömt, sowie auf die Form von Furchen beziehungsweise Dünen, die bei einer ausreichend starken Strömung entstehen (wieder ein Schwellwertproblem).

Der »Kohärer« von Branly

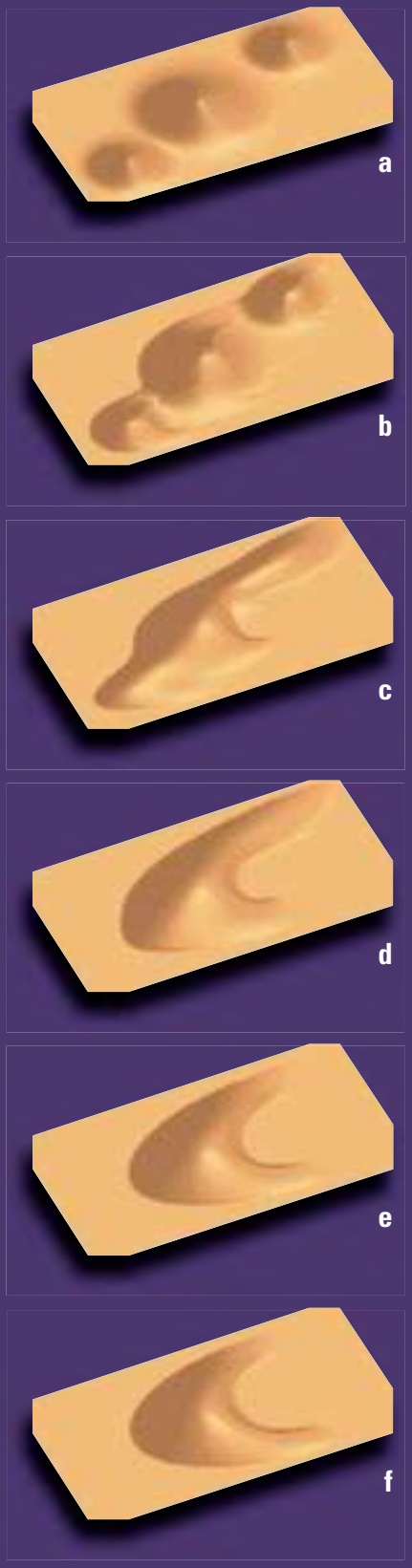
Das Funktionsprinzip des von Edouard Branly entwickelten »Kohärers« (hier abgebildet; ursprünglich auch Fritter genannt), mit dem der Durchgang einer elektromagnetischen Welle nachgewiesen werden kann, beruht auf der Perkolation. Bei dem Kohärer handelt es sich um eine mit oxidierten und daher nichtleitenden Metallspänen gefüllte Glasröhre. Durchläuft jedoch eine Funkwelle die Röhre, verbinden sich die Metallspäne – es kommt zu einer »Kohäsion« – und werden leitend. Der Durchgang der elektromagnetischen Welle bewirkt, wie bei einer Perkolation, einen Strom führenden Pfad in dem Metallpulver, so als hätte man entlang einer Körnerreihe eine Schweißnaht hergestellt. Nach dem Empfang der Welle wird durch einen leichten Schlag mit einem Klöppel der Widerstand des Metallpulvers wieder heraufgesetzt. Mit einem solchen Kohärer wurde im Jahr 1898 eine vom Eiffelturm ausgesandte elektromagnetische Welle am Panthéon empfangen. Aber auch heute noch sind einige Fragen zum Funktionsprinzip des Kohärers ungeklärt.

POUR LA SCIENCE

Diese Überlegungen haben einen speziellen praktischen Bezug. Denn wir beginnen eigentlich erst heute die Mechanismen zu verstehen, durch die sich Wanderdünen bilden und bewegen. Solche bogenförmigen Sandhügel – Sicheldünen oder Barchans genannt – treten hauptsächlich im Maghreb und in Mauretanien auf. Die Frage, wie man derartige Dünen stabilisieren kann, wird allein dadurch ein Stück weit gelöst, dass man die Abläufe bei der Entstehung, beim Nachrutschen und bei der Verschiebung der Sandhügel untersucht.

Durch diese physikalischen Grundlagenforschungen konnte ein Dialog zwischen zwei Disziplinen entstehen, die sich zuvor eher gegenseitig ignoriert hatten. Noch vor 25 Jahren wusste der durchschnittliche Physiker nichts mit dem Young'schen Modul in der Elastizitätslehre anzufangen. Der Ingenieur wiederum hatte kaum Ahnung von statistischer Mechanik. Eine solche Isolierung der Disziplinen führt zwangsläufig zu einer Entfremdung von ▷

Wie entsteht eine Sanddüne?



H. J. HERRMANN

Simulation der Entstehung einer Sicheldüne (eines so genannten Barchans), wie sie Hans Jürgen Herrmann durchgeführt hat: Die mathematische Ausgangsstruktur besteht aus drei Gauß'schen Erhebungen (a), die sich unter dem Einfluss eines permanent wehenden Linkswindes verformen. Die nachfolgenden Bilder (b bis f) sind durch sukzessive Iteration entstanden. Nach einhundert Iterationsschritten (e) hat die Düne die typische Sichelform angenommen, die im weiteren Verlauf der Simulation konstant bleibt (f). Die Entwicklung einer Dünensandmasse unter dem Einfluss des Windes kann aufschlussreiche Hinweise geben, wie man am besten gegen die drohende Versandung von Nutzflächen vorgeht.

▷ der Realität. Schon der Gelehrte Jules Henri Poincaré bedauerte vor rund hundert Jahren, dass die von Mathematikern gelehrte Mechanik keinerlei Gemeinsamkeiten mit dem Wissen der Ingenieure habe. Diese Ignoranz bestimmte damals das Verhältnis zwischen den Vertretern der beiden Fachrichtungen.

Das änderte sich zum Glück – in Frankreich beispielsweise, als vor etwa 25 Jahren zahlreiche Physiker Mechanikkurse an der ehrwürdigen École des Houches bei Grenoble belegten. Diese Annäherung zwischen Ingenieuren und Physikern sowie die Entwicklung neuartiger Untersuchungsmethoden wie etwa des Rastertunnelmikroskops, mit dem Oberflächen auf atomarer Skala vermessen werden können, ermöglichten es, die bisherigen physikalischen Vorstellungen mit der Realität zu vergleichen.

Unreinheit kann vorteilhaft sein

Der nach wie vor aktuelle Forschungszweig der Oberflächenphysik untersucht so zum Beispiel Phänomene der Haftung, der Feuchtung oder der Reibung auf allen Größenskalen. Dabei hat man auch festgestellt, dass es gar nicht unbedingt darauf ankommt, ultrareine Oberflächen herstellen zu können – »unreine« Grenzflächen sind nämlich besser reproduzierbar und zudem realitätsnäher. In den 1980er Jahren waren unsere Forschungsarbeiten über Supraleiter, die wir in einer Arbeitsgruppe um de Gennes in Orsay zwanzig Jahre zuvor begonnen hatten, in den Hintergrund gerückt. Als dann 1986 Georg Bednorz und Alexander Müller vom IBM-Forschungslaboratorium in Rüschlikon bei Zürich überraschend einen Supraleiter schufen, der bei weit höheren Temperaturen supraleitend wurde als die bisher genutzten intermetallischen Verbindungen, war das wie ein Lichtzeichen am trüben Himmel der klassischen Supraleitungsforschung, wo man um jedes zehntel Grad mehr gerungen hatte. Bednorz und Müller hatten die kritische Temperatur auf einen Schlag um mehrere dutzend Kelvin erhöht. Die beiden Physiker hatten auf ausreichend »unreine« keramische Kupferoxide gesetzt. Dieses Experiment wurde alsbald reproduziert und von allen Seiten bestätigt. Es zeigte sich mal wieder, dass alles gut funktioniert, außer der Theorie. Müller befand sich schon in Altersteilzeit, als er die Supraleitfähigkeit von Kupferoxiden beobachtete. Sein Experiment widersprach allen theoretischen Voraussagen und Annahmen, und er hatte zuvor bei niemandem Unterstützung für seine Idee gefunden, nicht einmal bei den Wissenschaftlern, die sich damals mit den physikalischen Eigenschaften solcher Metalloxide befassten. Vielleicht werden wir eines Tages widerstandsfreie Normaltemperaturleiter haben, und vielleicht werden wir dann im Baumarkt gefragt: »Standard oder supraleitend?«

Andere nennenswerte Überraschungen der letzten 25 Jahre stammen zum Teil aus Forschungsarbeiten, die nur unter dem Deckmantel der Effizienz nicht im Papierkorb gelandet sind. Aus diesem für die Physik fruchtbaren letzten Vierteljahrhundert möchte ich drei allgemeine Erkenntnisse betonen: Erstens wurden die Resultate zu den Materialeigenschaften von Cluster- und Vielteilchensystemen aus der statistischen Physik abgeleitet. Zweitens darf man nicht den Nutzen großer und kleiner technischer Hilfsmittel vergessen, welche die Beobachtungen auf nanoskopischer Ebene erst ermöglichen. Und drittens ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Wissenschaftlern wichtig, beispielsweise wenn es – wie in unserer Gruppe – um die Kontrolle der physikalisch-chemischen Eigenschaften von Oberflächen geht. ◁

Étienne Guyon forscht an der Hochschule für industrielle Physik und Chemie in Paris (École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles, ESPCI) und ist derzeit Vorsitzender der Französischen Physikalischen Gesellschaft (Société Française de Physique).

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Percolation. Von Geoffrey Grimmet. Springer-Verlag, Berlin 1999.

Vectorial cellular automaton for the stress in granular media. Von J. Hemmingsson, H. J. Herrmann und S. Roux in: Journal de Physique, Bd. 7, S. 291 (1997).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Viele Raubsaurier trugen offenbar schon ein Federkleid. Vorn jagt *Sinornithosaurus,* links im Hintergrund *Sinosauropteryx*. Auf dem Ast sitzt ein *Microraptor*. Von dieser Gattung fanden Paläontologen neuerdings Fossilien mit befiederten Hinterbeinen.

Zuerst kam die Feder

Federn entstanden früher als die Vögel – in einer Gruppe räuberischer Dinosaurier. Zum Fliegen dienten die Hautgebilde anfangs nicht.

Von Richard O. Prum und Alan H. Brush

Das Federkleid der Vögel stellt sicherlich die vielgestaltigste Körperbedeckung von Wirbeltieren dar. Ornithologen rätseln seit langem, wie die filigranen und trotz aller Leichtigkeit höchst robusten Federn in der Evolution entstanden. In den letzten fünf Jahren fanden sie darauf endlich erste Antworten. Zu ihrem Erstaunen trugen viele Dinosaurier bereits ein Gefieder, als es Vögel noch gar nicht gab.

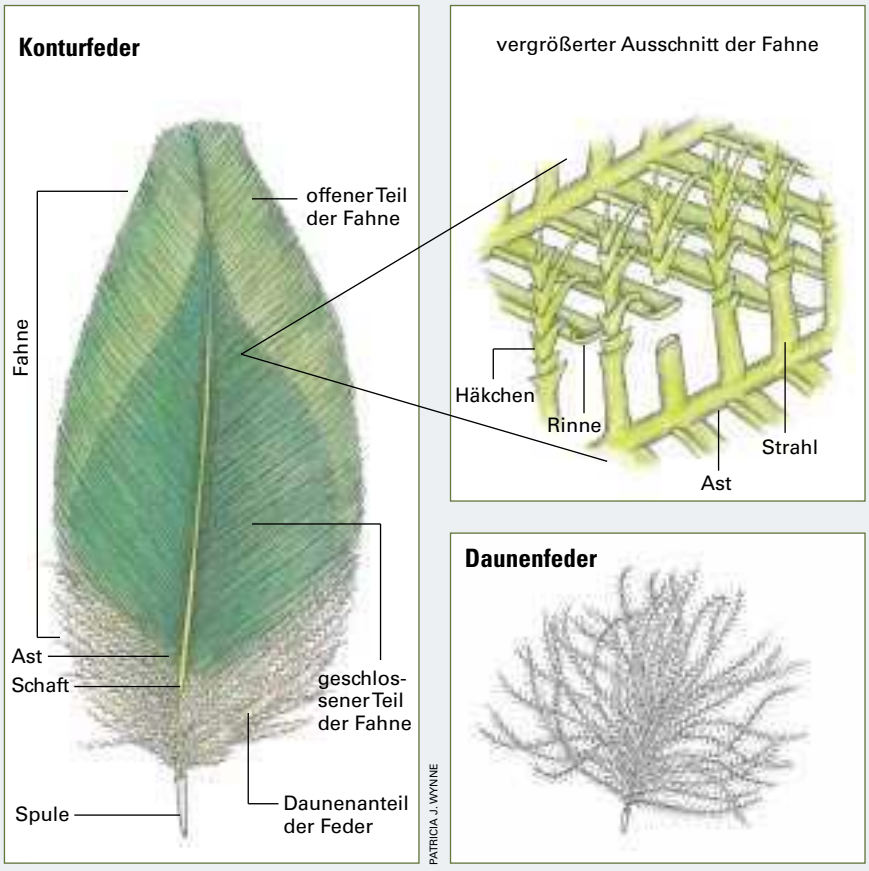
Die Vogelfeder bedeutet für Evolutionsforscher eine Herausforderung. Die Herkunft einer vollkommen neuartigen biologischen Struktur zu erklären ist viel schwieriger, als Ab- und Umwandlungen schon vorhandener Organe oder Körperteile nachzuvollziehen. In diesem Fall verfolgten die Wissenschaftler bisher die falsche Spur. Sie glaubten, Federn seien aus Reptilienschuppen entstanden, die sich verlängerten und spalteten. Auch irrten sie in der Vermutung, dass Federn von Anfang an vor allem einer einzigen besonderen Funktion – wie dem Fliegen – dienten.

Bis vor kurzem fehlten Fossilien von primitiven Federn. *Archaeopteryx lithographica*, der elstergroße Urvogel aus dem bayrischen Solnhofen, trug schon hoch entwickelte Schwung- und Steuerfedern, also Flugfedern. Von denen heutiger Vögel sind sie kaum unterscheidbar, obwohl *Archaeopteryx* vor etwa 148 Millionen Jahren – im späten Jura – lebte.

Aus zwei Wissenschaftsfeldern kommen jetzt neue Erkenntnisse. Das eine

Vogelfedern: komplex und variantenreich

Federn sind unglaublich verschieden gestaltet und haben fast ebenso viele unterschiedliche Funktionen. Dazu gehören Tarnung genauso wie Balz, Fliegen und Wärmeisolation. Die Vielfalt der Formen beruht auf Abwandlungen des Federschafts sowie der Äste und Strahlen. Die meisten Federn lassen sich dennoch einem von zwei Grundtypen zuordnen: Konturfedern oder Daunenfedern.



Konturfeder

Bei der charakteristischen Federfahne verschmelzen die paarweisen Federäste im zentralen Schaft. Im geschlossenen Teil der Fahne greifen winzige Häkchen an den von ihnen ausgehenden feinen Strahlen in Rinnen des Nachbarstrahls (Ausschnitt und mittlere Mikroaufnahme). Der Vogelflug erfordert Federn mit geschlossener Fahne.

Daunenfeder

Eine Daunenfeder oder Dune hat keine Fahne und nur einen angedeuteten Schaft. Stattdessen stehen die Äste im Büschel und tragen besonders lange Strahlen.

offene Fahne

geschlossene Fahne

MIKROAUFNAHMEN: TIM LEE QUINN

Äste einer Dune

verknüpft Evolutions- und Entwicklungsbiologie. Schon im 19. Jahrhundert hatten Naturforscher Beziehungen zwischen der Individualentwicklung und der Stammesgeschichte erkannt, aus denen der deutsche Zoologe Ernst Haeckel (1834–1919) Gesetzmäßigkeiten ableitete. Wenn auch manche seiner Schlussfolgerungen heute als widerlegt gelten – die Individualentwicklung »rekapituliert« nicht die Stammesgeschichte –, so finden sich in letzter Zeit doch auch neue Hinweise darauf, dass die Entwicklung von Strukturen bei einem Einzelorganismus einen gewissen Blick auf die Vorgeschichte seiner Art ermöglichen kann.

Das andere Feld ist die Paläontologie. In China sind in den letzten Jahren eine Menge Fossilien von Dinosauriern mit vielerlei primitiven und auch weiterentwickelten Federn aufgetaucht. Beides zusammen revolutioniert unser Wissen vom anfänglichen Aussehen, der ursprünglichen Bedeutung und der weiteren Evolution dieser Hautgebilde. Die erstaunlichste Entdeckung dabei: Die Evolution von Federn ging der Evolution der Vögel voraus – auch wenn noch nicht klar ist, wozu Fleisch fressende, zweibeinige Dinosaurier solche komplexen Strukturen besaßen. Nach neuesten Befunden scheint es sogar schon Dinosaurier gegeben zu haben, die mit ihren Federn fliegen konnten (siehe auch Kasten auf Seite 38/39).

Wie wachsen Federn bei heutigen Vögeln? Ganz anders als Reptilienschuppen, die sich aus Hautfalten bilden, erhebt sich die Feder aus einer röhrenförmigen Hauteinsenkung (siehe Kasten Seite 36/37). Zunächst wächst daraus ein runder, oben geschlossener Hohlstab, der sich zu den verschiedenen Federtypen ausdifferenziert. Wie auch Haare, Nägel und Schuppen bestehen Federn aus dem Keratin abgestorbener spezialisierter Zellen der Oberhaut. Neue wachsen bei der Mauser stets aus demselben Federbalg (Follikel) nach. Der untere Teil, die Spule, sitzt in der Haut. Vom langen Schaft zweigen die Äste ab, von denen viele feine Strahlen paarweise abgehen.

Noch nicht flügge

Die Federn dieser Nestlinge zweier Kakaduarten sind noch von einer Scheide umhüllt. Die Phase heißt Blutkielstadium: Noch leben viele der Zellen und sind von Blut versorgt.

GAIL J. WORTH, AVES INTERNATIONAL

Daunenfeder

gute Wärmeisolation durch füllige Struktur

Deckfeder

flächige Fahne formt Körperkonturen

Flugfeder

asymmetrische Fahne für Aerodynamik

FOTOS: TINA WEST

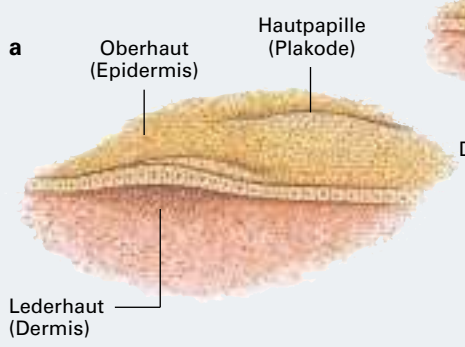
Ursprünglich eine Röhre

Die mannigfaltigen Federtypen von Vögeln beruhen auf Unterschieden der Form und des Feinbaus. Dennoch fallen die meisten weitgehend in zwei Klassen (Bilder ganz links). Entweder haben sie einen relativ kräftigen, langen Schaft mit einer flachen, glatten Fahne, deren Strahlen sich ineinander verzahnen. Hierzu gehören Deck-, Schwung- und Schwanzfedern, also die Konturfedern. Oder es sind die besonders weichen, wärmenden Flaumfedern, die Dunen. Bei ihnen ist der Schaft kurz und dünn. Die Äste der Dunenfahne tragen besonders lange Strahlen, die sich nicht miteinander verketten, sondern locker ineinander verweben. Auch Konturfedern tragen an der Basis oft Daunenäste.

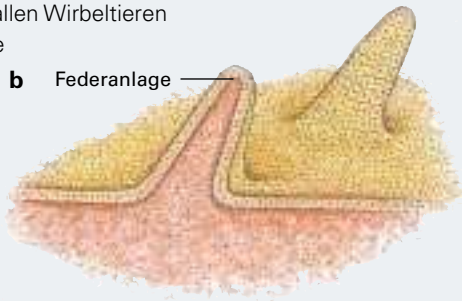
Wie Haare wachsen Federn von der Basis her, wenn sich die Keratinzellen im Federbalg teilen und dabei ältere Zellen nach oben schieben. Die Wachstumsmuster folgen allerdings einer besonders komplizierten Choreografie (siehe Bilder Seite 36/37). Dazu gehört, dass sich der hochwachsende innere Ring des Federbalgs, der so genannte Kragen, gleich in eine Anzahl Säulen unterteilt, aus denen später die Federäste werden. Auch Konturfedern wachsen zunächst als Röhre aus solchen Säulen. Ihr Schaft entsteht, indem die unteren Säulenenden an einer ▷

Wachstum einer Feder

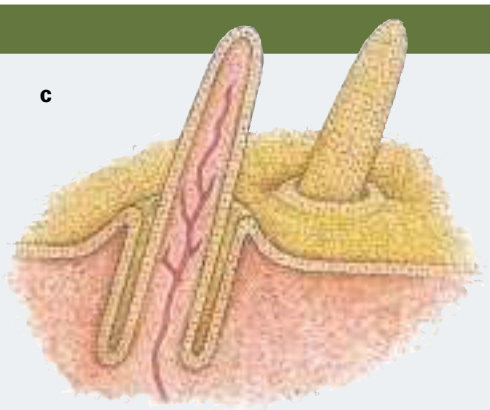
Federn bilden sich – wie auch Haare, Nägel und Schuppen – aus verhornenden, später absterbenden Zellen der äußeren Hautschicht, den Keratinocyten. Zurück bleiben Keratine: Proteinfilamente, die untereinander sehr feste Strukturen bilden. Federn bestehen aus beta-Keratinen, die nur Reptilien herstellen. Vögel sind nämlich genau genommen Reptilien. Die Scheide der wachsenden Feder ist aus dem weicheren alpha-Keratin gebildet, das bei allen Wirbeltieren vorkommt. Aus ihm bestehen etwa unsere Haare und unsere Hornhaut.



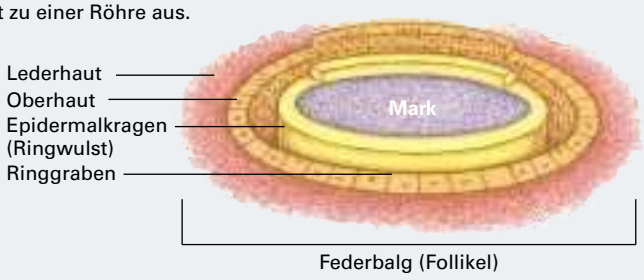
Zuerst verdicken sich Ober- und Lederhaut.



Die Verdickung wächst zu einer Röhre aus.



Der Follikel, der die Feder hervorbringt, entsteht, indem sich Zellen in einem Ring um die Federanlage herum vermehren und einsenken (siehe Detailzeichnung unten). Wenn die Feder wächst, drücken neue Keratinocyten am so genannten Epidermalkragen (Ringwulst) ältere Zellen nach oben.

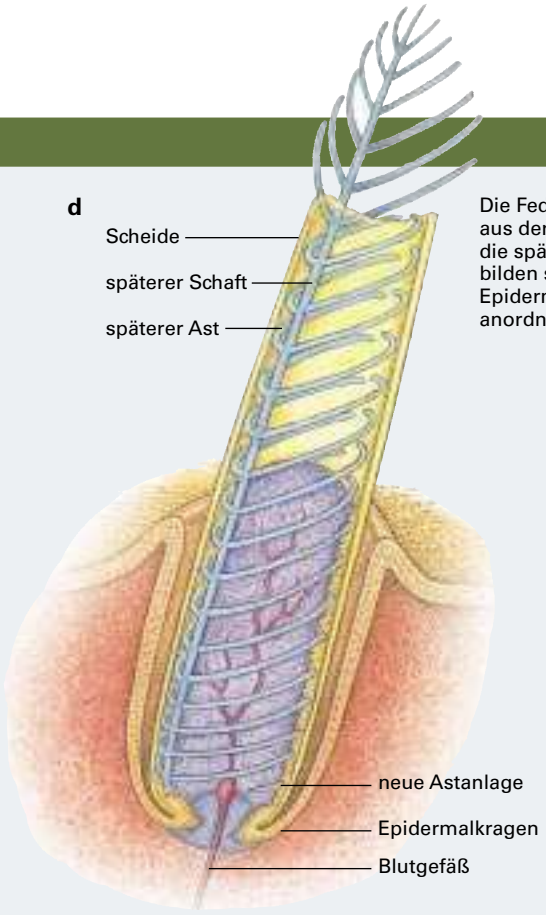


▷ Seite der Röhre eine nach der anderen miteinander verschmelzen. Gleichzeitig schieben sich an einer Stelle der Gegenseite von unten neue Säulen nach. Sie drücken dabei die schon vorhandenen Säulen schräg zur Seite, sodass sich diese spiralig um die Röhre legen.

Gemeinsam mit einer Reihe von Kollegen vertreten wir die These, dass man anhand dieser Wachstums- und Differenzierungsprozesse herleiten kann, wie die Vorläufer moderner Federn ausgesehen haben müssten. Wir gehen davon aus, dass es verschiedene Entwicklungsstadien gab, wobei die Strukturen immer komplizierter wurden. Denn die Federevolution muss schrittweise erfolgt sein, und jede weitere Neuerung konnte eigentlich nur auf der vorangegangenen aufbauen. Auch bei einer wachsenden Vogelfeder kommen Schritt für Schritt neue Gestaltungsmechanismen hinzu. Zum Beispiel sieht der Kragen des Federbalgs zuerst gleichmäßig aus, bevor sich darin dann Zellgruppen säulenweise zu den späteren Federästen formieren. In der Evolution sollte folglich eine unverzweigte Röhre der verzweigten Struktur vorangegangen sein. Gleichermaßen dürfte der Federschaft erst entstanden sein, nachdem einfache Federäste vorhanden waren. Bei einer wachsenden Feder bilden die Astsäulen den Schaft ja erst nachträglich durch Verschmelzen an der Basis.

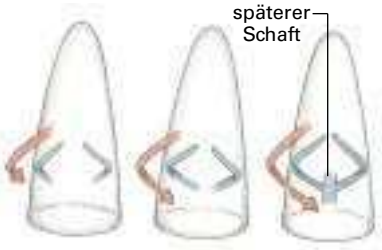
Gestützt auf solche Beobachtungen, stellten wir 1999 ein Evolutionsmodell der Vogelfeder vor. Konturfedern, so postulierten wir, entstanden in den folgenden fünf aufeinander aufbauenden Stadien (siehe Kasten Seite 38/39). Im Stadium 1 existierte lediglich eine unverzweigte Röhre. Im Stadium 2 differenzierte sich der Kragen des Federbalgs in eine innere Schicht – deren Zellen sich so ordneten, dass Säulen (die späteren Federäste) herauswuchsen – und in eine Außenschicht, die zur schützenden Scheide der wachsenden Feder wurde. Diese Federn sahen wie Büschel aus.

Stadium 3 wäre bereits eine Feder mit breiter, flacher Fahne. Von einem langen, kräftigen Schaft in der Mitte gehen nach zwei Seiten dicht nacheinander viele Äste ab, die ihrerseits zu ihren Nachbarn hin feine Strahlen absenden. Doch in dieser Phase verzahnen sich die Federstrahlen noch nicht. Zwei Möglichkeiten sind

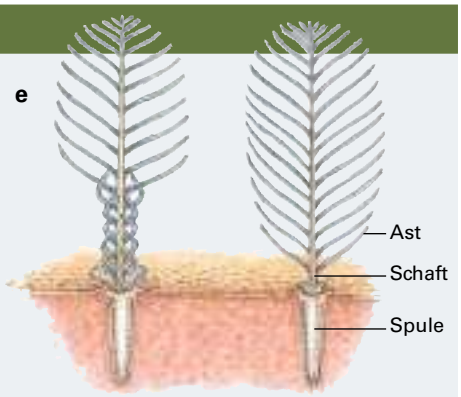


Die Feder wächst in einer Scheide aus der äußeren Epidermisschicht, die später aufplatzt. Die Federäste bilden sich aus Zellen der inneren Epidermisschicht, die sich in Säulen anordnen.

Wie der Schaft entsteht



Bei einer Konturfeder wachsen die zukünftigen Federäste spiralig um den Epidermalkragen zu einer Seite der Röhre hin, bis sie verschmelzen und dadurch den späteren Schaft bilden. Mit von unten nachfolgenden, neu entstehenden Ästen geschieht das Gleiche. Bei Daunenfedern wachsen die Äste nicht spiralig (kein Bild). Diese Federn haben nur an der Basis einen einfachen Schaft.



Nach einiger Zeit bricht die Feder aus der Scheide und entfaltet sich. Wenn sie zu wachsen aufhört, bildet der Epidermalkragen an der Federbasis eine einfache Röhre aus, die Spule.

WIE FEDERN WACHSEN, KANN MAN SICH UNTER **HTTP://FALLON.ANATOMY.WISC.EDU/FEATHER.HTML** ANSEHEN.

PATRICIA J. WYNNE

denkbar, wie diese Form aus Stadium 2 entstanden sein könnte. Dafür mussten zwei Neuerungen zusammenkommen: der Schaft (in der Darstellung auf Seite 38/39 Stadium 3a) und die mit Strahlen behafteten Federäste (Stadium 3b). Das heutige Federnwachstum lässt nicht klar erkennen, was von beidem in der Evolution zuerst auftrat.

Molekulare Choreografie des Wachstums

Später, in Stadium 4, dürften die Verzahnungen der kleinen Strahlen entstanden sein. Der Federbalg brachte nun entsprechend kompliziert strukturierte Säulen hervor. Somit bot die Fahne der Luft Widerstand. In diesem Stadium waren ihre beiden Seiten noch symmetrisch. Aber hieraus konnten sich schließlich die heutigen vielfältigen Formen von Stadium 5 entwickeln, etwa auch Gebilde wie die Schwungfedern eines Vogelflügels mit ihrer asymmetrischen Fahne.

Interessanterweise finden sich auch bei den modernen Vögeln Federn aller fünf von uns postulierten Stadien. Das dürften allerdings nachträglich wieder vereinfachte Formen sein, denn schließlich besaß schon *Archaeopteryx* komplexe Federn des Stadiums 5. Der Vergleich deutet aber an, dass auch heute noch alle fünf vorgeschlagenen Evolutionsstadien in den Entwicklungsmöglichkeiten eines Federfollikels liegen.

Unser Modell wird bis zum postulierten Stadium 3 auch durch molekulare Befunde an jungen Federn bestärkt. Wie Matthew Harris und John F. Fallon von der Universität von Wisconsin in Madison und einer von uns (Prum) herausfanden, sorgen beim Vogel für die Ausdifferenzierung der Federstrukturen unter anderem zwei Gene beziehungsweise deren Proteine. Sie sind bei Wirbeltieren generell als Signalgeber am Wachstum der Gliedmaßen und der Finger sowie der unterschiedlichen Hautanhänge, also der Haare, Zähne und Nägel, entscheidend beteiligt. Das eine Gen heißt *Shh (sonic hedgehog)*, das andere *Bmp2 (bone morphogenetic protein 2)*.

Die zugehörigen Proteine, Shh und Bmp2, koordinieren die Ausbildung einer Feder sozusagen im Duett mit verschiedenen Stimmen. Beides sind Signalmoleküle, die sich in den einzelnen Phasen des Wachstums an entscheidenden Stellen immer wieder zu Worte melden. Dabei regt Shh zur Zellteilung an, während Bmp2 deren Ausmaß kontrolliert und für die Zelldifferenzierung sorgt.

Gleich zu Anfang, noch bevor sich ein Federbalg in der Haut gebildet hat, nehmen diese beiden Proteine durch ihre spezifische Verteilung Einfluss. Sie bestimmen, wo später Ober- und Unterseite der Feder sein werden, indem sie an gegenüberliegenden Seiten der Hautpapille auftreten, sozusagen das eine vorn, das andere hinten. Als Nächstes werden ▷

IN KÜRZE

- Federn traten schon bei **Theropoden**, einer Gruppe der Dinosaurier, auf. Sie entstanden nicht aus Reptilienschuppen, sondern sind Neubildungen.
- Anfangs dienten Federn nicht zum Fliegen. Doch offenbar besaßen einige Theropoden später schon **funktionsfähige Flugfedern**.
- **Die Evolution der Feder** lässt sich anhand des Federwachstums bei modernen Vögeln rekonstruieren.
- Vögel sind genau genommen ein Zweig **gefiederter Dinosaurier**.

▷ die beiden Signalmoleküle in der Spitze der Röhre hergestellt, die sich herauszuschieben beginnt. Noch später treten diese Moleküle in jenen Zellen auf, welche die sich gerade bildenden Säulen für die zukünftigen Federäste trennen. Durch ihre Verteilung geben sie dort das Wachstumsmuster der Astsäulen vor.

Desgleichen bestimmen die beiden Signalstoffe die Entwicklung des Schaftes einer Konturfeder. Hierzu erscheinen sie in einem Verteilungsmuster, das die Säulen der Röhre in eine spiralige Anordnung zwingt und an der zur Federbasis weisenden Seite ihre Verschmelzung zum Schaft bewirkt. Bei Flaumfedern ist das Muster einfacher.

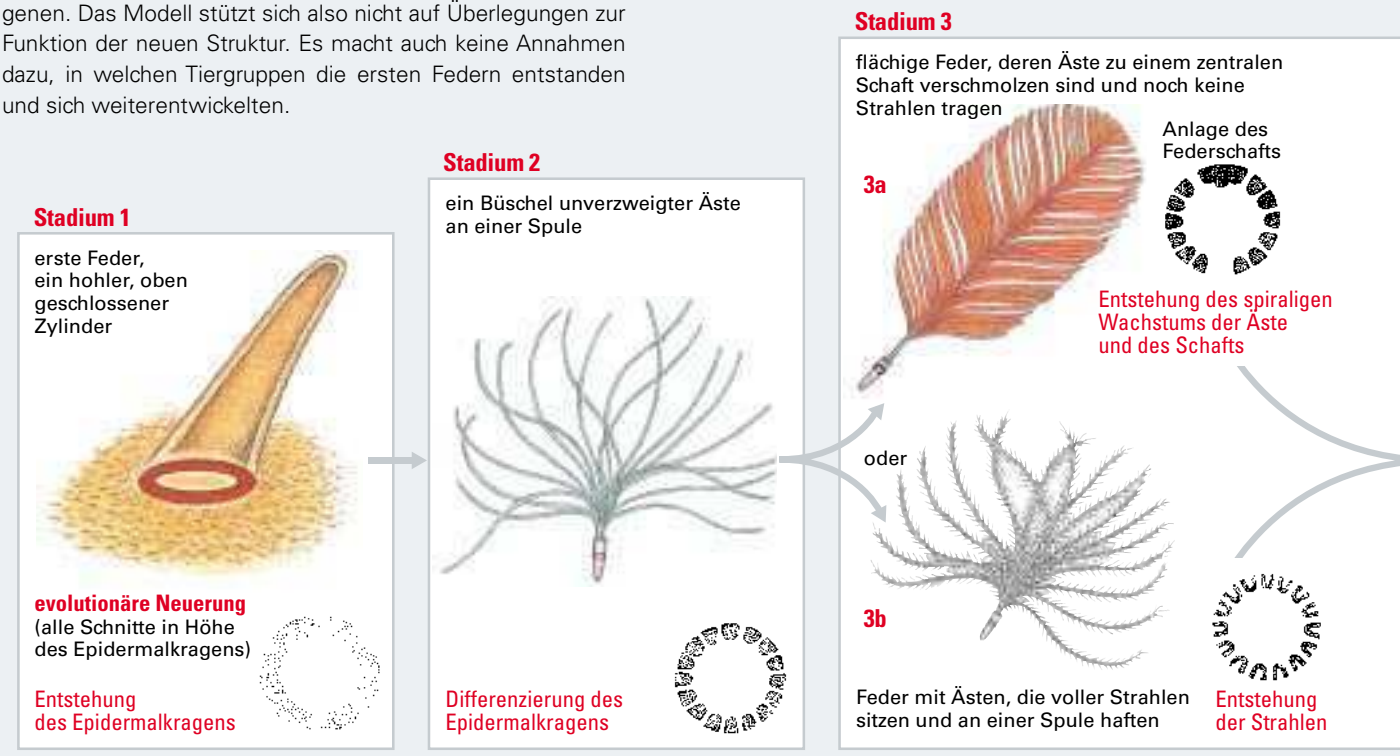
Erbe der Dinosaurier

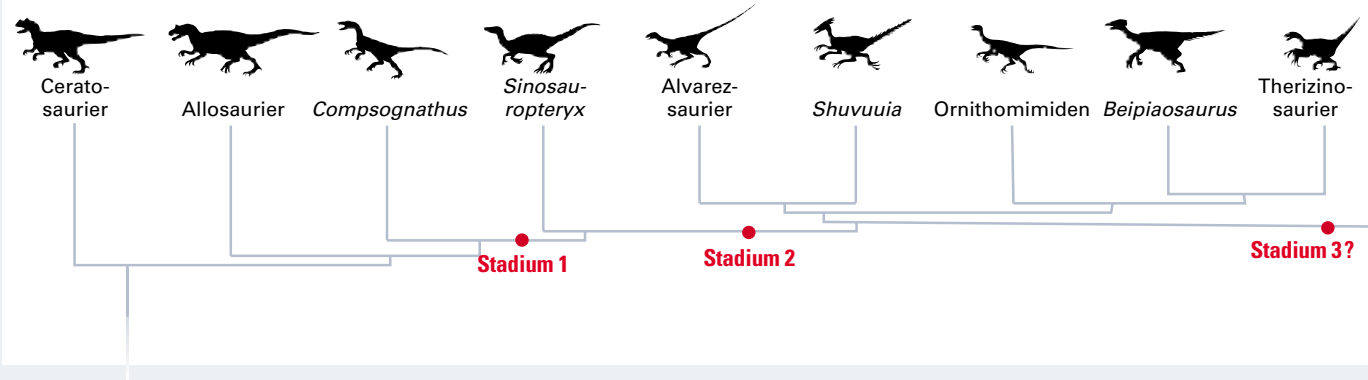
Am schönsten zeigen aber die vielen chinesischen Fossilfunde befiederter Dinosaurier aus der frühen Kreidezeit, dass unser Modell der Federevolution zutreffen könnte. Erst in den letzten Jahren förderten chinesische, amerikanische und kanadische Paläontologen diese rund 125 Millionen Jahre alten Versteinerungen in Nordchina in der Provinz Liaoning zu Tage. In der dortigen Yixian-Formation lagern Fossilien vieler verschiedener Organismen. So stammen von dort die älteste bekannte Blütenpflanze und das erste Säugetier, das seine Jungen – anders als

Modell der Federevolution

Oft lässt sich die Evolution einer neuen Struktur mittels beobachtbarer Entwicklungsmechanismen rekonstruieren. Anhand des Wachstums einer Vogelfeder entstand dieses Modell der Reihenfolge, in der die einzelnen Neuerungen der Vogelfeder aufgetreten sind. Jeder Schritt fußt dabei auf dem vorangegangenen. Das Modell stützt sich also nicht auf Überlegungen zur Funktion der neuen Struktur. Es macht auch keine Annahmen dazu, in welchen Tiergruppen die ersten Federn entstanden und sich weiterentwickelten.

Neuere Dinosaurierfossilien aus China lassen tatsächlich die einzelnen postulierten Evolutionsstadien von Federn erkennen (Stammbaum unten). Vermutlich kam jedes neue Stadium in einer eigenen Gruppe der Theropoden hinzu.



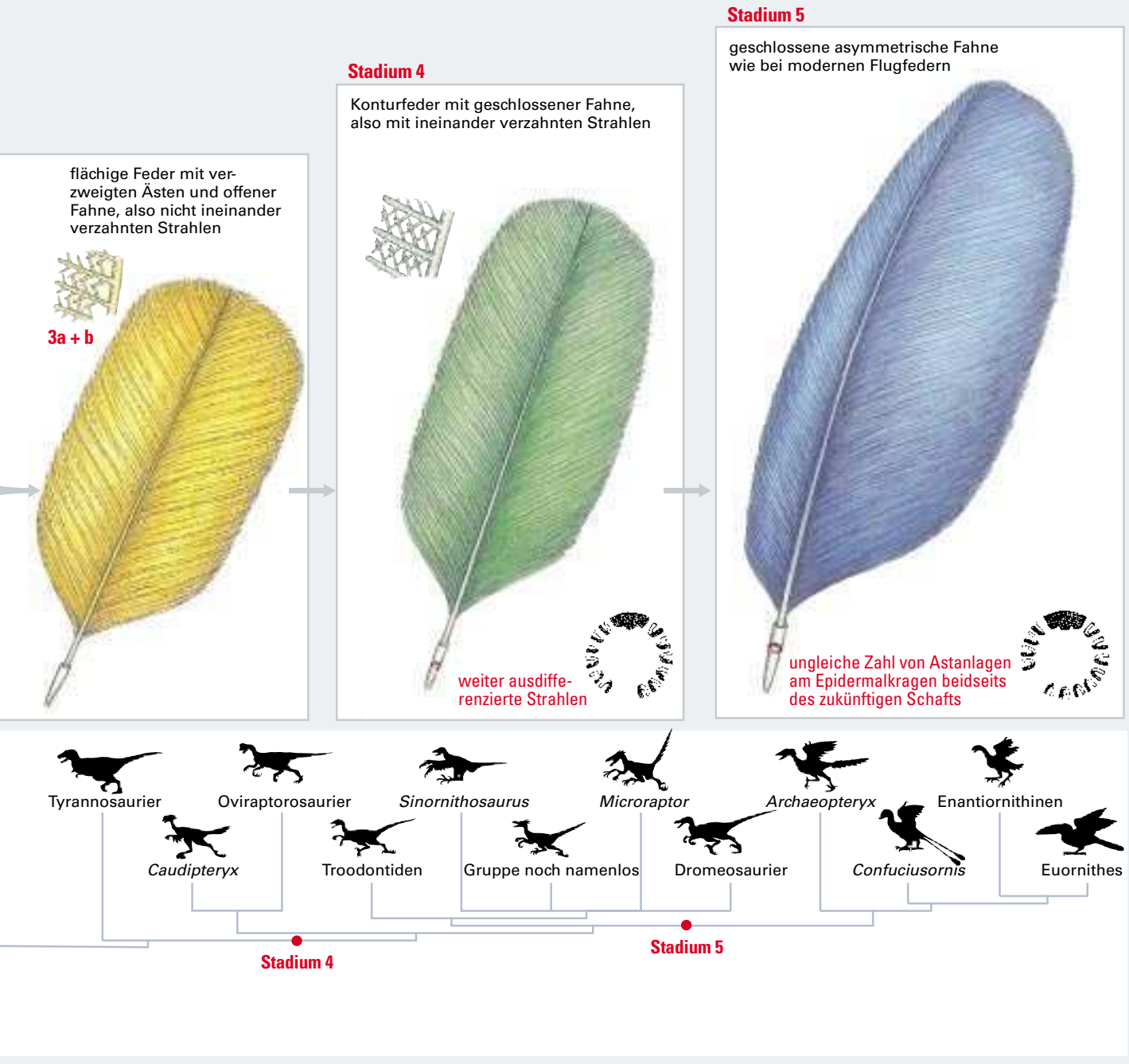


PATRICIA J. WYNNE

Beuteltiere – bis zur Geburt über eine Plazenta ernährte. Die Forscher bargen auch Überreste von einer Vielfalt früher Vögel.

Außerdem enthalten die Gesteine Fossilien von meist kleinen bis mittelgroßen Theropoden – aus der Gruppe jener landlebenden, großenteils zweibeinigen, räuberischen Dinosaurier, zu denen der gewaltige *Tyrannosaurus rex* gehörte. Von einigen dieser Tiere waren schon vorher Versteinerungen bekannt, anhand derer sich ihre verwandtschaftliche Stellung zuordnen ließ. Durch Vergleich der anatomischen Merkmale dieser und anderer Fossilien konnten Paläontologen die Abstammung der Vögel von den Theropoden aufzeigen. Sie stellten fest, dass manche Charakteristika im Körperbau der Vögel bereits bei diesen Reptilien vorhanden waren oder sich andeuteten (siehe »Der Ursprung der Vögel und ihres Fluges«, Spektrum der Wissenschaft 4/98, S. 38). Doch wann erstmals Federvorformen aufgetreten waren und in welchen Linien die Hautstrukturen nach und nach ihre komplizierten Eigenschaften erhielten, war zunächst unklar.

Den ersten gefiederten Dinosaurier – *Sinosauropteryx* – fanden die Paläontologen 1997. Der etwa hühnergroße Coelosaurier trug auf der Haut kleine röhrenförmig-längliche, womöglich sogar ver- ▷



▷ zweigte Gebilde (siehe Seite 32, links). Als Nächstes stießen die Forscher auf ein truthahngroßes Tier – *Caudipteryx* – mit wundervoll erhaltenen, modern aussehenden Konturfedern an Schwanzspitze und Vorderextremitäten (siehe Bild unten).

Einige Wissenschaftler hielten *Caudipteryx* für einen frühen, flugunfähigen Vertreter der Vögel. Eine Reihe phylogenetischer Analysen zeigt aber, dass dieses befiederte Tier zu den Oviraptoren gehört, einer Gruppe der theropoden Dinosaurier. Bald häuften sich solche Funde. So kamen in China auch mehrere Dromaeosaurier mit Konturfedern zu Tage. Diese Dinosaurier gelten als die nächsten Verwandten der Vögel, waren aber selbst eindeutig keine Vögel.

Alles in allem entdeckten die Forscher über ein Dutzend gefiederte Theropoden, die nicht zur Gruppe der Vögel gehörten. Darunter sind der straußengroße Therizinosaurier *Beipiaosaurus* und etliche andere Dromaeosaurier, wie *Microraptor* und *Sinornithosaurus*. Als sensationell gilt der kürzliche Fund eines vierflügeligen *Microraptor*, der erstmals erahnen lässt, dass manche Dinosaurier mit ihren Federn wohl tatsächlich fliegen konnten – wie auch immer sie das machten (siehe Kasten rechts).

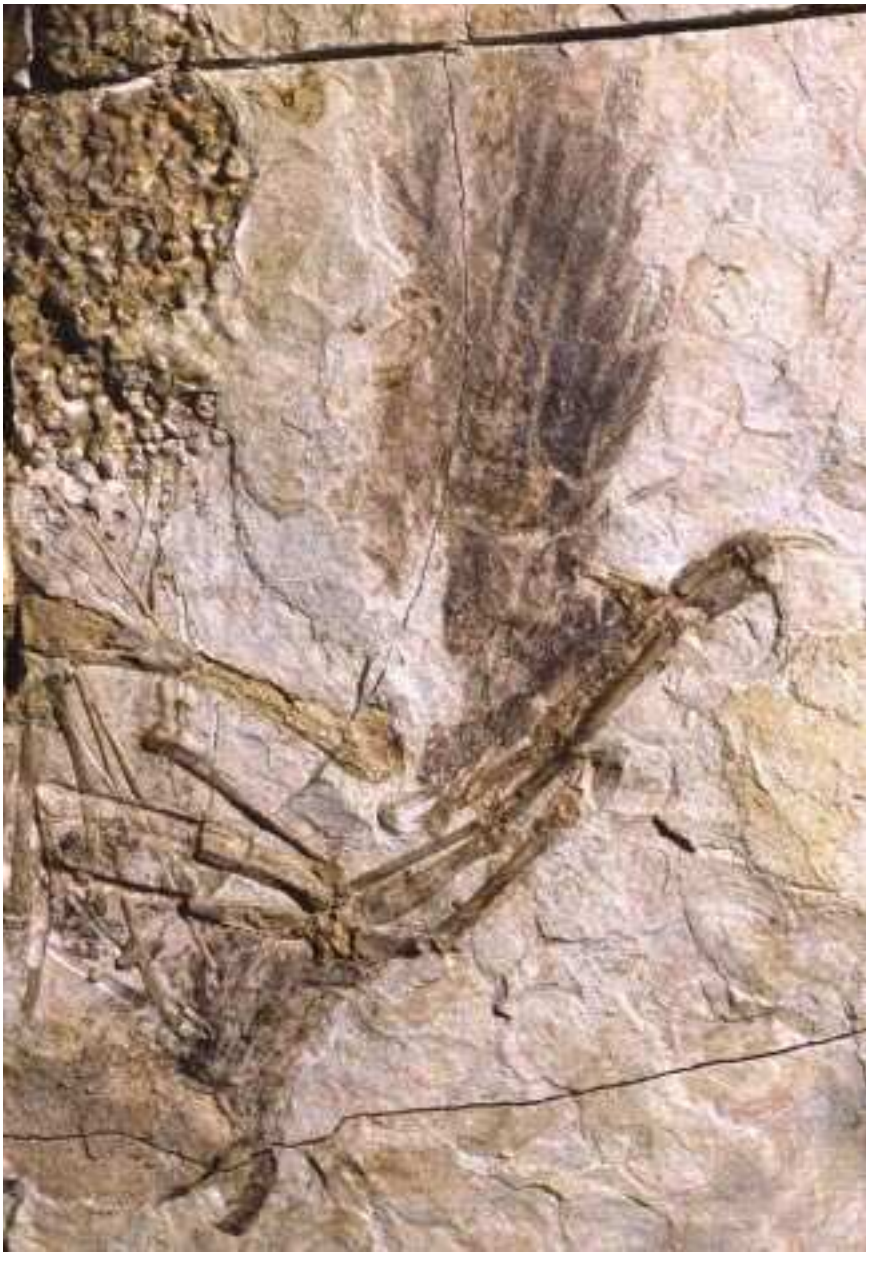
Die chinesischen Fossilien beweisen klar: Federn entstanden nicht erst mit den Vögeln, sondern lange vorher in einer Linie von landlebenden, zweibeinigen, räuberischen Dinosauriern. Manche Federn dieser Reptilien gleichen heutigen Vogelfedern, andere wirken einfacher. Zudem sind verschiedene Differenzierungsgrade erkennbar. Demnach müssen sich der moderne Federbau und im Wesentlichen sogar die heutige Vielfalt der Erscheinungsformen bereits bei diesen Theropoden entwickelt haben.

Vögel: Untergruppe der Dinosaurier

Zwar sind die chinesischen Fossilien jünger als die des »Urvogels« *Archaeopteryx*. Aus den Abstammungsbeziehungen der einzelnen Gruppen lässt sich aber schließen, wann ungefähr Federn bei den gemeinsamen Vorfahren auftraten – auch, an welchen Verzweigungspunkten des Stammbaums sie schrittweise komplizierter geworden waren. Demnach ging die Evolution der Federn dem Auftritt der Vögel voran. Und allen Anzeichen nach dienten die neuen Hautgebilde über lange Zeit anderen Zwecken als dem Fliegen. Als sich die Linie der Vögel von den anderen Theropoden abzweigte, existierten bereits höchst kompliziert gestaltete Federn. Die Vogelfeder ist demnach ein Erbe dieser Dinosaurier.

Die erstaunliche Vielgestaltigkeit von Federn bei den verschiedenen Dinosauriern bekräftigt unser Modell einer stufenweisen Federevolution. Die meisten postulierten Stadien lassen sich bei diesen Fossilien wiederfinden. Die einfachsten Gebilde, simple Röhren, kennen wir von *Sinosauropteryx* (siehe Bild Seite 32, links). Sie scheinen dem Stadium 1 unseres Modells erstaunlich zu ähneln. *Sinosauropteryx* hatte außerdem fedrige Büschel ohne Schaft, die dem hypothetischen Stadium 2 glichen. Solche büschelartigen Federn kamen ebenfalls bei *Sinornithosaurus* und ein paar anderen Theropoden abseits der Vögel vor (siehe Bild Seite 38/39).

Andere Arten besaßen Konturfedern, Gebilde mit Schaft und Fahne, die offenbar schon geschlossen, also in sich verzahnt war – entsprechend dem postulierten Stadium 4. Und von *Microraptor*



MICK ELLISON

Der Ausschnitt eines Fossils von *Caudipteryx*, einem theropoden Dinosaurier, zeigt deutlich Federn am Vorderbein. Das ungefähr truthahngroße Reptil trug auch am Schwanz Konturfedern, die in dem Präparat ebenfalls hervorragend zu erkennen sind.

Ein Dinosaurier mit vier Flügeln

Erst vor kurzem tauchte in China das Fossil eines Dinosauriers auf, der offensichtlich an Armen und Beinen asymmetrische Federn trug, die wie Schwungfedern moderner Vögel aussahen. Nach Ansicht die Entdecker könnte dieses Tier vier Flügel besessen haben. Für seine Flugfähigkeit spricht auch, dass die außen an den Extremitäten sitzenden Federn stärker asymmetrisch waren als die zum Körper hin, wie bei heutigen Vögeln.

Erstmals scheint nun erwiesen, dass außer den Vögeln auch andere Dinosaurier Federn ausbildeten, die sich bereits zum Fliegen eigneten.

Die Entdecker halten das vierflügelige Reptil für eine neue Art der schon bekannten Gattung *Microraptor* (siehe Bild Seite 32) und nennen sie *Microraptor gui*. Der Fund unterstützt ihres Erachtens die These, der Vogelflug sei aus einem Gleitflug entstanden, bei dem die Tiere von Bäumen herabsegelten.

XING XU

***Microraptor gui* – ein Raubsaurier mit Schwungfedern?**

Zusammen hätten die befiederten Arme und Beine einen hervorragenden Gleitschirm gebildet.

sind seit neuestem sogar asymmetrische Federn bekannt.

Genau genommen stellen die Vögel eine Untergruppe gefiederter Dinosaurier dar. Zum aktiven Flug verhelfen ihnen die Schwung- und Steuerfedern von Flügeln und Schwanz. Dass sich sogar manche Merkmale des Gefieders moderner Vögel schon bei anderen Theropoden entwickelten, darauf weisen die Federfächer an der Schwanzspitze von *Caudipteryx*, von dem erst vor wenigen Jahren entdeckten *Protopteryx* und von Dromaeosauriern hin. Höchstwahrscheinlich trugen auch etliche berühmte Dinosaurier wie *Tyrannosaurus* und der Dromaeosaurier *Velociraptor* ein Federkleid. Vögel sind also nicht die einzigen gefiederten Wirbeltiere – und vielleicht nicht einmal die einzigen, die ihre Federn zum aktiven Fliegen benutzten.

Nach früheren Vorstellungen entwickelten sich Federn aus Reptilienschuppen, die sich verlängerten und dann am Rand zu Ästen ausfransten. Diese Äste bekamen später noch Seitenstrahlen mit sich verzahnenden Strukturen. Ein solches Modell passt aber nicht zum beobachteten Wachstumsmuster. Wären Federn aus Schuppen entstanden, müssten ihre Vorder- und Rückseite deren einstiger Ober- und Unterseite entsprechen. Die obere und untere Fläche einer Schuppe sind die Ober- beziehungsweise Unterseite der herauswachsenden Hautpartie. In Gegensatz dazu zeigen sich bei einer Feder Vorder- und Rückseite erst, wenn sich die Fahne entrollt. Ihre beiden Flächen entsprechen der Außen- beziehungsweise Innenseite der Röhre. Federn sind also nicht abgewandelte Schuppen, sondern zunächst Röhren.

Spannend bleibt die Frage, wozu Federn ursprünglich taugten. Zum wirklichen Fliegen eignen sich nur hoch entwickelte Gebilde, also Konturfedern mit geschlossener Fahne, die auch asymmetrisch sein sollten. Die verbreitete Idee, dass diese auffälligen und aufwendigen Hautauswüchse von Anfang an mit dem Fliegen mindestens zu tun hatten, wenn das nicht sogar immer schon ihre eigentliche Funktion war, lässt sich nicht mehr halten. Genauso gut könnte man behaupten, unsere Hände seien zum Klavierspielen entstanden. Richtig dürfte sein, dass die aerodynamischen Eigenschaften von Federn irgendwann für den Flug genutzt wurden, als sie längst hochkompliziert geworden waren. Vorher müssen sie einen anderen Sinn gehabt haben.

Wozu benötigten Dinosaurier ein Federkleid ?

Andere ältere Vorschläge zur ursprünglichen Funktion von Federn erscheinen weiterhin plausibel. Ob das Gefieder den Dinosauriern vorrangig zur Wärmeisolation diente, die Haut vor Wasser schützte, ob sich die Tiere damit tarnten oder Balzeffekte erzielten, vielleicht auch mit den Federn Angreifer abwehrten, werden wir vermutlich nie herausfinden. Einen so genauen Einblick in die Lebensweise dieser Tiergruppe liefern die an sich vorzüglich erhaltenen Fossilien nicht.

Anzunehmen ist aber, dass jede der einzelnen Neuerungen, die bei dieser Evolution aufeinander aufbauten, einen eigenen Zweck erfüllte. Schon die allereinfachsten Röhrenfedern müssen einen Überlebensvorteil bedeutet haben.

Kritiker der Evolutionstheorie nennen gern die Feder als Beispiel für deren Grenzen. So seien keine Übergangsformen zwischen Schuppe und Feder vorhanden. Einsichtig sei auch nicht, wieso die Natur aus Schuppen zuerst zerfaserte Gebilde machte, um die Fasern später mit einem aufwendigen, neu erfundenen Mechanismus wieder flächig zu verweben.

Federn zeigen wunderbar, wie der Ursprung einer evolutionären Neuerung erforscht werden kann. Lassen wir uns hiervon beflügeln. ◁

Richard O. Prum (oben) und **Alan H. Brush** forschen seit langem über Federn. Prum hat eine Professur für Ökologie und Evolutionsbiologie an der Universität von Kansas in Lawrence. Am dortigen Naturhistorischen Museum und Forschungszentrum für biologische Vielfalt ist er Kurator für Ornithologie. Brush war Professor für Ökologie und Evolutionsbiologie an der Universität von Connecticut in Storrs.

Probleme der frühen Vogelevolution. I. Die Sache mit den Federn. Von D. Stefan Peters in: Natur und Museum, Bd. 131, Heft 11, S. 387, 2001.

Dinosaurs Take to the Air. Von Richard O. Prum in: Nature, Bd. 421, S. 323, 23. Januar 2003.

The Evolutionary Origin and Diversification of Feathers. Von Richard O. Prum und Alan H. Brush in: Quaterly Review of Biology, Bd. 77, Heft 3, S. 261, September 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Transdermale Pflaster

Arzneimittel zum Aufkleben

Von Ulrich Schmidt

Es scheint verblüffend einfach: Der Patient bekommt keine Spritze, er schluckt keine Tablette – stattdessen klebt er ein Pflaster auf die Haut. Diese so genannten transdermalen therapeutischen Systeme (TTS) geben ihren Wirkstoff gleichmäßig durch die Haut an den Blutkreislauf ab: High-Tech-Produkte, deren Wirkung oftmals die hergebrachter Arzneiformen übertrifft.

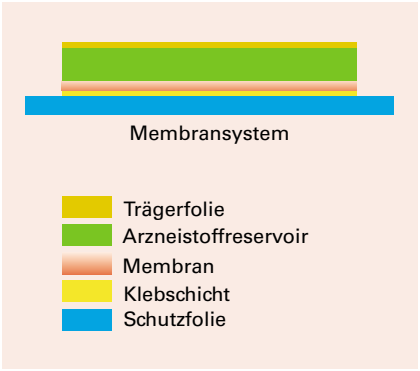
Die Haut ist mit einer Fläche von bis zu zwei Quadratmetern das größte Organ des Körpers. Weil ihre Hauptfunktion aber im Schutz des Körpers vor äußeren Einflüssen liegt, wurde die Möglichkeit, Arzneimittel über sie zu verabreichen, lange nicht gesehen. Das hat sich geändert. Heute sind transdermale Pflaster etabliert. Das Schmerzmittel Fentanyl, Nitroglycerol zur Behandlung von Angina pectoris, Östrogen und Testosteron zur Hormonsubstitution und Scopolamin zur Vorbeugung von Seekrankheit können einfach aufgeklebt werden. Nikotinpflaster sollen Rauchern helfen, von ihrer Sucht loszukommen. In den USA kann seit 2001 sogar mit einem Pflaster verhütet werden. In Deutschland wartet das Produkt noch auf seine Zulassung.

Und so funktionieren therapeutische Pflaster: Unter der Abdeckfolie befindet sich das Reservoir mit dem Wirkstoff. Von dort durchdringt die Substanz die äußerste Hautschicht, die Epidermis, bevor sie von den darunter liegenden Kapillargefäßen in den Blutkreislauf aufgenommen wird. Die Wirkstoffmoleküle diffundieren durch mikroskopisch kleine Lücken zwischen den Hautzellen, aber auch durch die Zellen selbst; nur 0,1 bis 0,5 Prozent gelangen durch Poren und Drüsen in den Körper. Die Moleküle müssen einerseits fettlöslich sein, um durch die Haut zu gelangen, andererseits aber auch gut wasserlöslich für ihre Reise im Blut.

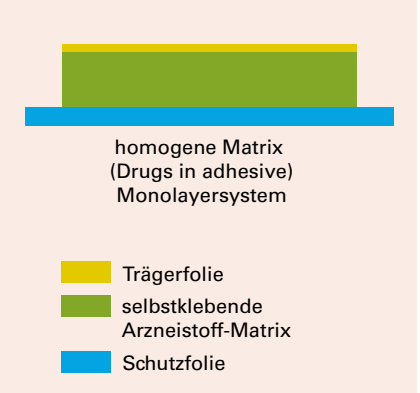
Die Therapie über die Haut hat viele Vorteile. So gibt das Pflaster über einen längeren Zeitraum eine konstante Menge des Wirkstoffs ab, während bei der Einnahme einer Tablette die Konzentration der therapeutischen Substanz im Blut kurzzeitig ansteigt, um dann wieder abzufallen. Darüber hinaus reicht bei einigen hoch wirksamen Medikamenten eine geringere Dosierung aus, weil der Verdauungstrakt umgangen wird. Weniger potente Stoffe können dagegen nicht per Pflaster verabreicht werden, weil sie eine zu große Fläche beanspruchen würden. Beispiel Aspirin: Um die Wirkstoffmenge einer Tablette über die Haut aufzunehmen, wäre das Zehnfache der gesamten Körperoberfläche nötig.

Noch eignen sich nur eine Hand voll Arzneistoffe für eine transdermale Therapie. Größere Moleküle können die Barriere der Haut nicht durchdringen. Zwar verbessern zugesetzte Substanzen die Aufnahme, doch ist es nach wie vor nicht möglich, Insulin oder Impfstoffe per Pflaster zu verabreichen. Wissenschaftler forschen deshalb an neuen Pflastertypen. So könnte elektrischer Strom aus einer winzigen Batterie ionisierte Wirkstoffmoleküle durch die Haut hindurchstoßen. Alternativ könnten hunderte mikroskopisch kleine, auf dem Pflaster angebrachte Kanülen die Epidermis durchdringen. Ob die Haut dabei Schaden nimmt, ist aber noch nicht geklärt. ◁

Ulrich Schmidt studiert Journalistik an der Johannes-Gutenberg-Universität in Mainz. Er dankt dem Institut für Pharmazie der Universität Tübingen für Informationen.



Membranpflaster garantieren einen nahezu konstanten Fluss des Wirkstoffs über einen längeren Zeitraum. Allerdings kann sich das Reservoir schlagartig entleeren, wenn die Membran beschädigt wird.



Bei Matrix-Pflastern besteht das Reservoir aus einem Polymer, das den Wirkstoff kontrolliert abgibt.

WUSSTEN SIE SCHON?

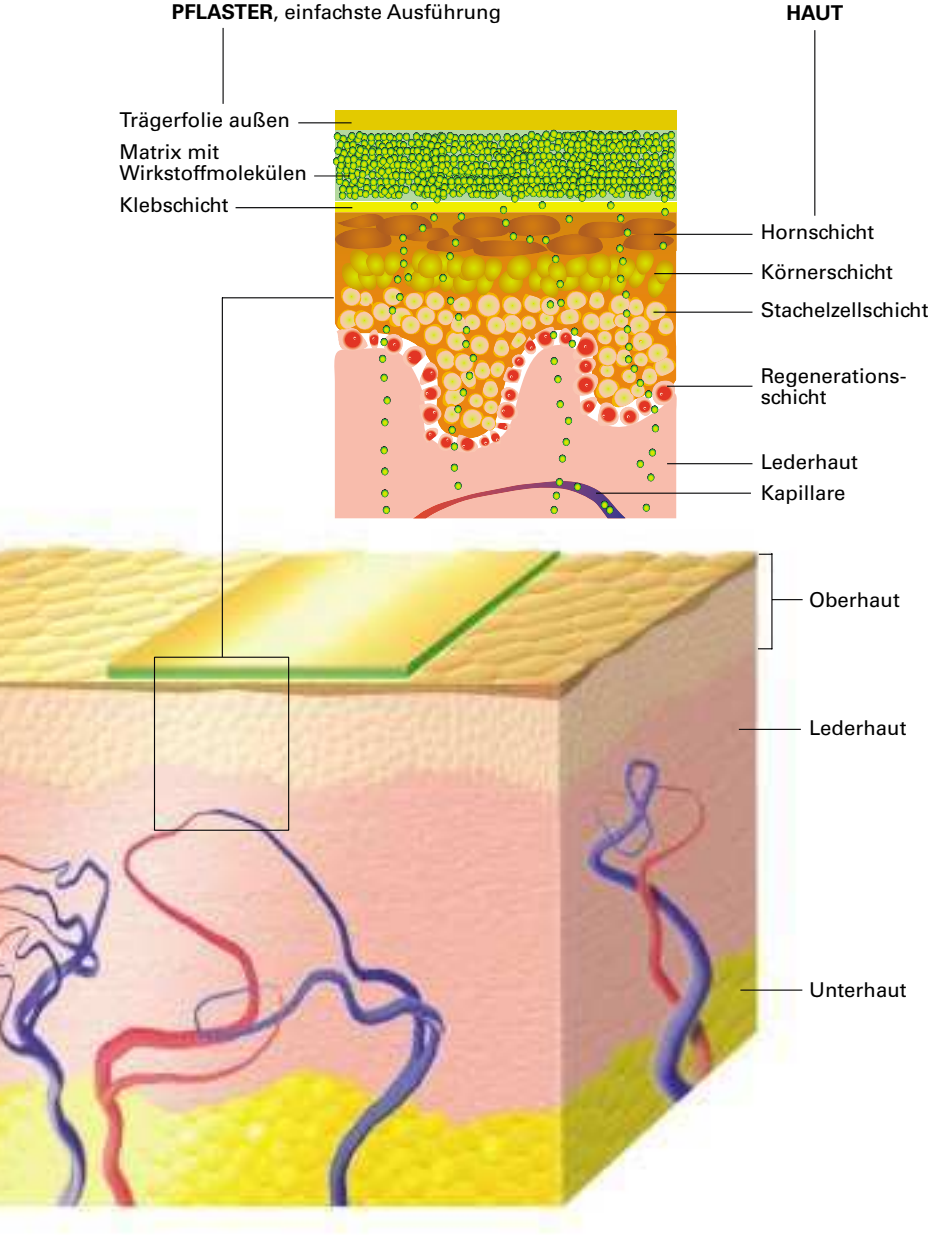
Wie viel Wirkstoff an die Haut abgegeben wird, hängt von den unterschiedlichen Konzentrationen im Pflaster ab. Um eine gleichmäßige Abgabe zu erreichen, verbleibt deshalb nach Gebrauch ein Überschuss von bis zu achtzig Prozent der ursprünglichen Menge im Pflaster. Entsprechend muss dieses arzneigerecht entsorgt werden.

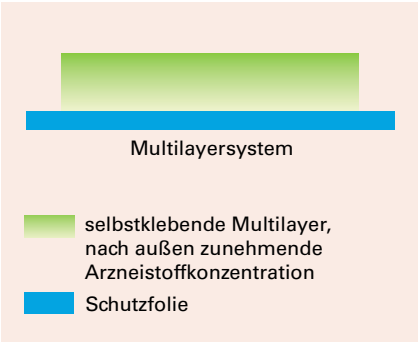
Die Orte, an denen die Pflaster aufgeklebt werden, sollten variieren, denn einige Wirkstoffe können Hautreizungen hervorrufen. Bei Testosteronpflastern etwa sollte eine Hautstelle erst nach sieben Tagen Erholungszeit wieder erneut beklebt werden.

Die Haut ist an verschiedenen Stellen des Körpers **unterschiedlich aufnahmefähig**. So wird hinter den Ohren etwa sechsmal mehr Wirkstoff aufgenommen als am Unterarm.

Die weitaus meisten **therapeutischen Pflaster** auf dem Markt dienen der Hormonsubstitution in den Wechseljahren. Allerdings geriet die Behandlung vergangenes Jahr in die Kritik: Die weltweit größte Studie zur Hormonersatztherapie in den Vereinigten Staaten wurde vorzeitig abgebrochen, weil bei der kombinierten Behandlung mit Östrogenen und einem Gestagen die Häufigkeit von Brustkrebs und Herz-Kreislauf-Krankheiten deutlich zunahm. Seitdem wird von einer entsprechenden Behandlung über einen längeren Zeitraum abgeraten.

ALLE GRAFIKEN VON THOMAS BRAUN. HAUPTGRAFIK NACH: »LEHRBUCH DER PHARMAZEUTISCHEN TECHNOLOGIE« VON KURT H. BAUER ET AL., STUTTGART 2002.
KLEINE GRAFIKEN NACH EINER VORLAGE DES INSTITUTS FÜR PHARMAZEUTISCHE TECHNOLOGIE DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN.





Multilayersysteme sind eine spezielle Art von Matrix-Pflastern, bei denen der Wirkstoff in nach außen zunehmender Konzentration im Reservoir eingelagert ist. Eine rapide Abnahme der Konzentration soll auf diese Weise verhindert werden.

Zwar schützt die Haut primär vor äußeren Einflüssen, eine gewisse Durchlässigkeit aber besitzt sie für viele Wirkstoffe. Diese Eigenschaft nutzt das therapeutische Pflaster: Es setzt den Wirkstoff allmählich frei, der anschließend durch die Oberhaut in die Lederhaut dringt. Dort wird er von den Kapillargefäßen in den Blutkreislauf aufgenommen.

Die Suche nach Dunkler Materie

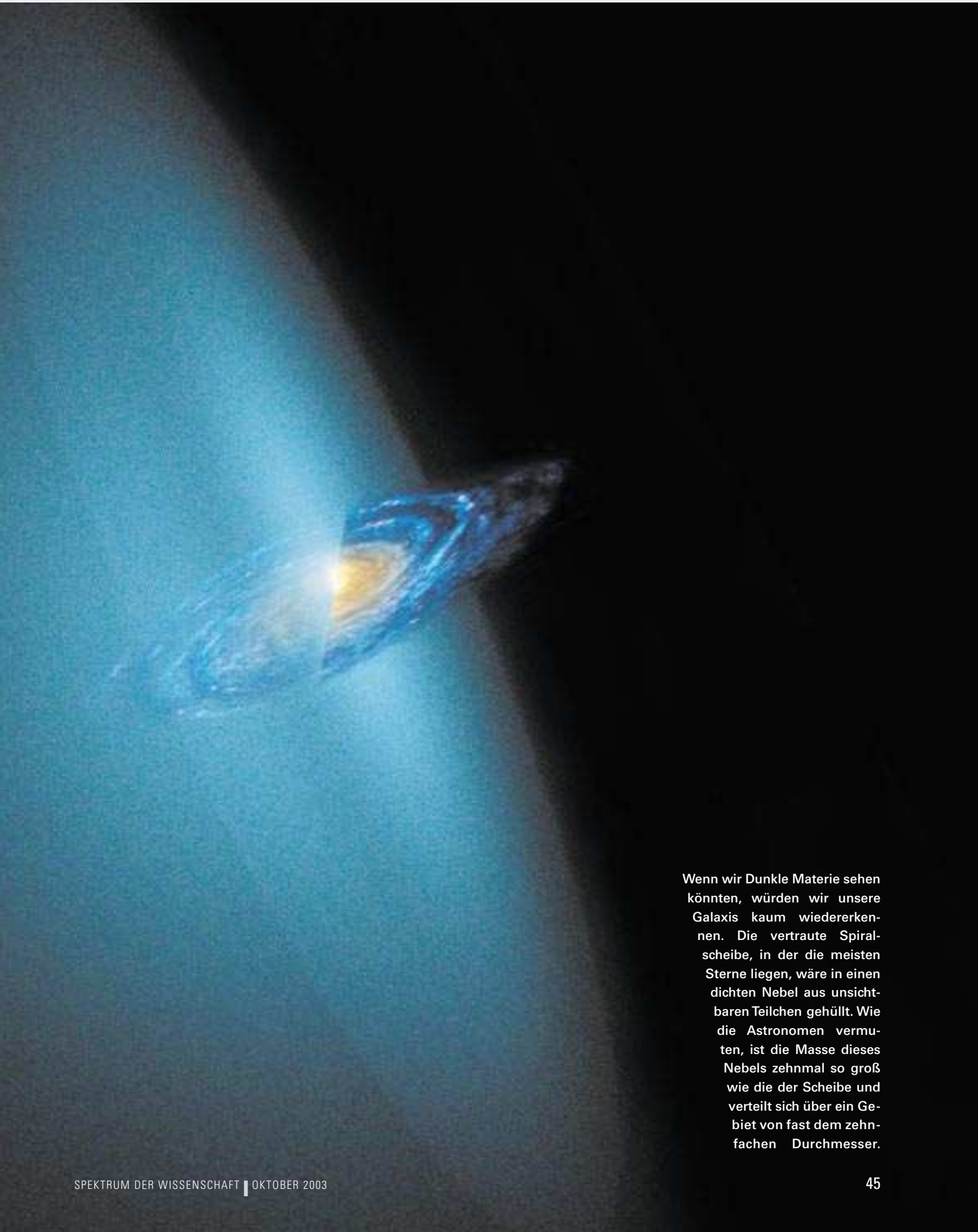
Das Weltall ist offenbar von riesigen Mengen unbekannter Teilchen erfüllt, die sich nur durch ihre Schwerkraft bemerkbar machen. Teilchenphysiker in aller Welt versuchen nun, das Wesen der exotischen Partikel zu enträtseln.

Von David B. Cline

Eigentlich ist das Universum ganz anders, als es aussieht. Sämtliche Sterne machen weniger als ein Prozent der Gesamtmasse des Alls aus; interstellares Gas und andere Formen gewöhnlicher Materie bringen es alles in allem auf weniger als fünf Prozent. Die Bewegungen dieser sichtbaren Substanzen enthüllen, dass sie nichts weiter sind als Treibgut in einem dunklen Meer aus unbekanntem Material. Über diesen Ozean wissen wir kaum etwas. Die Namen, die wir seinen Bestandteilen geben – »Dunkle Materie« und »Dunkle Energie« –, drücken vor allem unsere Unkenntnis aus.

Seit siebzig Jahren sammeln die Astronomen immer mehr Indizien für die Existenz Dunkler Materie, und fast niemand mehr bezweifelt sie. Aber Indizienbeweise befriedigen nicht wirklich: Sie vermögen andere Erklärungen nicht endgültig auszuschließen, etwa gewisse Modifikationen physikalischer Gesetze (siehe »Gibt es Dunkle Materie?« von Mordehai Milgrom, Spektrum der Wissenschaft 10/2002, S. 34). Auch verraten sie nicht viel über die Eigenschaften der hypothetischen Substanz. Wir wissen praktisch nur, dass die Dunkle Materie sich zusammenklumpt und mit ihrer Schwerkraft Galaxien und Galaxienhaufen bindet. Sie besteht höchstwahrscheinlich aus einer bisher unentdeckten Art von Ele- ▷

DON DIXON



Wenn wir Dunkle Materie sehen könnten, würden wir unsere Galaxis kaum wiedererkennen. Die vertraute Spiralscheibe, in der die meisten Sterne liegen, wäre in einen dichten Nebel aus unsichtbaren Teilchen gehüllt. Wie die Astronomen vermuten, ist die Masse dieses Nebels zehnmal so groß wie die der Scheibe und verteilt sich über ein Gebiet von fast dem zehnfachen Durchmesser.

▷ mentarteilchen. Hingegen ist die Dunkle Energie – trotz der verwirrenden Namensähnlichkeit – eine völlig andere Substanz, die erst 1998 kosmologische Prominenz erlangte; sie erfüllt den Raum gleichmäßig und bewirkt, dass die Expansion des Universums sich beschleunigt.

Letztlich wird nicht die Astronomie, sondern die Teilchenphysik die Details dieser dunklen Komponenten ergründen. In den vergangenen acht Jahren haben Forscher beider Disziplinen ihre Kräfte vereint und gemeinsame Konferenzen abgehalten. Das nächste »Symposium über Quellen und Nachweis von Dunkler Materie und Dunkler Energie im Universum« wird im Februar 2004 in Marina del Rey (Kalifornien) stattfinden.

Das Rätsel der unsichtbaren Partikel

Es geht darum, die Dunkle Materie mit denselben Techniken nachzuweisen und zu untersuchen, die sich unter anderem bei der Analyse von Positronen und Neutrinos bewährt haben. Statt die Existenz der unbekannten Materie aus der Beobachtung ferner Himmelsobjekte zu erschließen, möchten die Wissenschaftler hier auf Erden nach ihr suchen.

Die Suche nach den Partikeln der Dunklen Materie gehört zu den schwierigsten physikalischen Vorhaben überhaupt. Nur die Suche nach den Trägern der Dunklen Energie ist noch problematischer und nicht einmal in Umrissen absehbar. Auf dem ersten Symposium im Februar 1994 bezweifelten fast alle Teilnehmer, dass ein irdischer Detektor überhaupt jemals Dunkle Materie nachweisen könne. Selbst die besten Instrumente hätten damals noch tausendmal empfindlicher sein müssen, um mutmaßliche Dunkle Teilchen einzufangen. Doch seitdem ist die Empfindlichkeit der Detektoren um das Tausendfache gestiegen, und bald wollen die Instrumentenbauer einen weiteren Faktor tausend herausholen. Mehr als 15 Jahre Forschung und Entwicklung tragen endlich Früchte. Vielleicht wissen wir schon bald, woraus der Kosmos wirklich besteht. Entweder erweist sich dann die Dunkle Materie als real – oder die herrschenden Theorien der modernen Physik müssen abdanken.

Aus was für einer Sorte Teilchen könnte die Dunkle Materie bestehen? Astronomische Beobachtungen und physikalische Theorie liefern nur allgemeine Hinweise. Es können weder Protonen noch Neutronen sein noch irgendetwas, das einst aus Protonen oder Neutronen bestand, zum Beispiel massereiche Sterne, die zu Schwarzen Löchern kollabierten. Denn nach Berechnungen der Teilchensynthese beim Urknall – die durch die gemessenen Mengen von Wasserstoff, Helium und Lithium im Universum gut abgesichert sind – reicht die Anzahl solcher Teilchen einfach nicht für die Dunkle Materie aus.

Auch Neutrinos können nur einen kleinen Bruchteil der Dunklen Materie ausmachen. Diese extrem leichten Elementarteilchen, die sich fast ungehindert durchs All bewegen, galten zunächst als plausible Kandidaten für Dunkle Materie, doch hat sich ihre Masse dafür als zu gering erwiesen (Spektrum der Wissenschaft 10/1999, S. 44). Überdies sind Neutrinos »heiß«, das heißt, sie jagten fast mit Lichtgeschwindigkeit durch das frühe Universum. Heiße Partikel waren aber zu leichtfüßig, um sich in den kosmischen Strukturen niederzulassen, die wir heute beobachten.

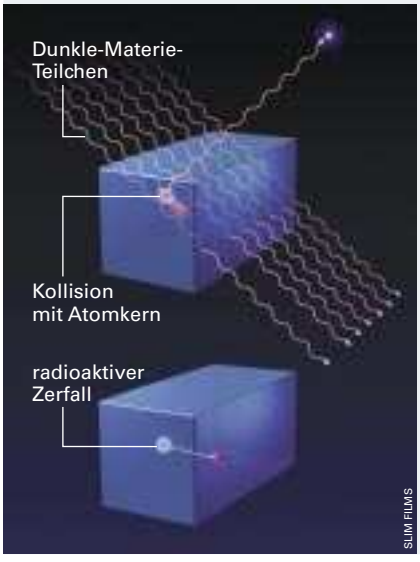
Zu den astronomischen Beobachtungen passt am besten die so genannte Kalte Dunkle Materie. Der Name bezeichnet eine hypothetische Teilchenart, die sich seit ihrer Entstehung nur träge von der Stelle bewegt. Zwar schafft die Kalte Dunkle Materie ihre eigenen Probleme bei der Erklärung kosmischer Strukturen (Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 54). Dennoch halten die meisten Kosmologen diese Nachteile für gering gegenüber den Schwierigkeiten alternativer Hypothesen. Das gegenwärtige Standardmodell der Teilchenphysik bietet keine Partikel an, die als Kalte Dunkle Materie in Betracht kommen, doch Erweiterungen des Modells – die keineswegs aus astronomischen Gründen entwickelt wurden – liefern eine ganze Schar plausibler Kandidaten (siehe »Neue Physik jenseits des Standardmodells« von Gordon Kane, Spektrum der Wissenschaft 9/2003, S. 26).

Kür der Kandidaten

Als Dunkle-Materie-Teilchen käme das so genannte Axion in Frage, ein sehr leichtes neutrales Partikel, das von Theoretikern postuliert wurde, um gewisse Symmetrien der Starken Wechselwirkung zu erklären. Zum Nachweis eines kosmischen Axions müsste man es einem starken Magnetfeld unterwerfen. Dadurch könnte es sich in ein Photon im Mikrowellenbereich verwandeln, und dieses wiederum wäre in einem Mikrowellen-Resonator nachweisbar. Die Suche nach kosmischen Axionen hat begonnen, erfordert aber – falls es diese hy-

IN KÜRZE

Die meisten Astronomen glauben, dass das Universum von Dunkler Materie erfüllt ist, aber ihre Beobachtungen sind zu ungenau, um das eindeutig zu beweisen – oder gar die detaillierten Eigenschaften dieser geheimnisvollen Substanz zu messen. Die Teilchenphysiker versuchen ihrerseits, die Dunkle Materie, während sie fast ungehindert durch die Erde strömt, mit speziellen Detektoren zu erfassen.



▶ **Die Teilchen der Dunklen Materie** sollten hin und wieder mit gewöhnlichen Atomen in Wechselwirkung treten. Wenn ein solches Teilchen von einem Atomkern abprallt, erleidet dieser einen Rückstoß, trifft auf umgebende Atome und setzt Energie in Form von Wärme oder Licht frei.

▶ **Das Problem** ist vor allem, wie dieser seltene Vorgang von viel häufigeren Prozessen – etwa radioaktiven Zerfällen – unterschieden werden kann. Darum betrachten die meisten Forscher die bisher einzige Meldung vom Nachweis Dunkler Materie mit Skepsis.

Die Zusammensetzung des Universums

Substanz	Teilchenart	typische Teilchenmasse oder -energie in Elektronenvolt	Anzahl der Teilchen im beobachteten Universum	Anteil an der Masse des Universums	Indizien
gewöhnliche (»baryonische«) Materie	Protonen, Elektronen	10^6 bis 10^9	10^{78}	5 Prozent	direkte Beobachtung, Herleitung aus Elementhäufigkeiten
Strahlung	Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung	10^4	10^{87}	0,005 Prozent	Beobachtungen mit Radioteleskopen
Heiße Dunkle Materie	Neutrinos	≤ 1	10^{87}	0,3 Prozent	Neutrinomessungen, Herleitung aus kosmischer Struktur
Kalte Dunkle Materie	supersymmetrische Teilchen?	10^{11}	10^{77}	25 Prozent	Herleitung aus Galaxiendynamik
Dunkle Energie	»skalare« Teilchen?	10^{-33} (falls Dunkle Energie Teilchen umfasst)	10^{118}	70 Prozent	Supernova-Beobachtungen als Beleg für beschleunigte kosmische Expansion

DON DIXON / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

pothetischen Teilchen überhaupt gibt – offenbar empfindlichere Detektoren.

Die mit Abstand am besten untersuchte Erweiterung des Standardmodells ist die Supersymmetrie, auf die ich mich darum hier konzentrieren will. Sie ist eine attraktive Erklärung für die Dunkle Materie, weil sie eine komplett neue Teilchenfamilie postuliert – einen »Superpartner« für jedes bekannte Elementarteilchen. Diese neuen Partikel sind allesamt schwerer und somit träger als bekannte Teilchen. Als natürlicher Kandidat für die Kalte Dunkle Materie gilt vor allem das Neutralino, eine hypothetische Mischung aus den Superpartnern des Photons (das die elektromagnetische Kraft überträgt), des Z-Bosons (Träger der Schwachen Kernkraft) und vielleicht noch anderer Teilchentypen. Der Name ist etwas unglücklich, denn er erinnert zu sehr an »Neutrino«; zwar haben beide Teilchen gewisse Gemeinsamkeiten, sind aber doch grundverschieden.

Das Neutralino ist zwar nach normalen Maßstäben schwer, aber vermutlich das leichteste der supersymmetrischen Teilchen. Falls das zutrifft, muss es stabil sein: Wenn ein Superteilchen instabil ist, zerfällt es in zwei leichtere Superteilchen, aber das Neutralino ist schon das leichteste. Wie der Name sagt, trägt das Teilchen keine elektrische Ladung und wird darum von elektromagnetischen Kräften – etwa Licht – nicht tangiert. Mit seinen Eigenschaften – Neutralität, Masse und Stabilität – erfüllt das Neutralino alle Anforderungen an Kalte Dunkle Materie. Die Urknalltheorie ergibt eine Abschätzung für die Zahl der Neutralinos, die im heißen Urplasma des Kosmos entstanden sein können. Dieses Plasma war ein chaotisches Gebräu aus allen möglichen Arten von Partikeln.

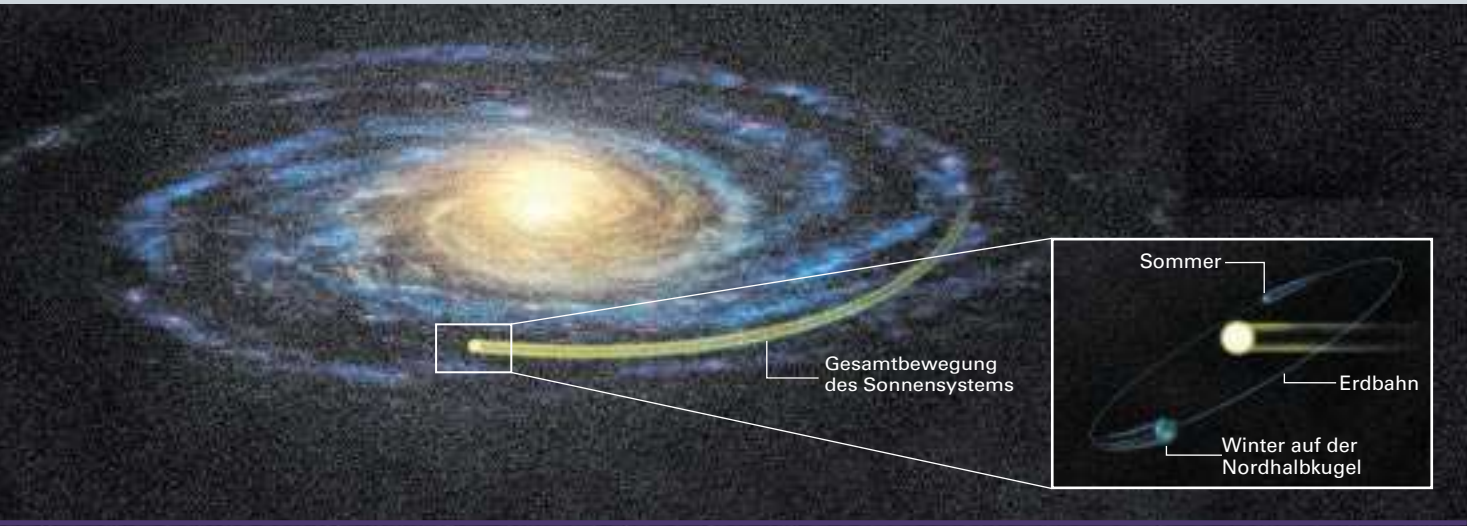
Schöpferische Zerstörung

Jedes einzelne Teilchen kollidierte sofort mit einem anderen, sie vernichteten einander, daraus entstanden neue Teilchen, die wiederum mit anderen kollidierten und einen rasenden Kreislauf von Schöpfung und Zerstörung weitertrieben. Doch mit sinkender Temperatur und Dichte des Universums wurden die Kollisionen weniger heftig und der Kreislauf erlahmte. Eine Teilchenart nach der anderen kondensierte aus dem Plasma – erst diejenigen, die eher selten kollidierten, dann die kollisionsfreudigeren.

Da das Neutralino ein besonders kollisionsscheues Teilchen ist, fror es sehr früh aus dem Plasma aus. Zu jener Zeit war die Dichte des Universums noch so hoch, dass eine riesige Anzahl von Neutralinos erzeugt wurde. In der Tat entspricht die gesamte Masse der Neutralinos – berechnet aus ihrer mutmaßlichen ▷

Der dunkle Wind im Wechsel der Jahreszeiten

Auf seinem Weg durchs All wird unser Planet von einem »Fahrtwind« aus Dunkler Materie durchströmt. Dunkle Materie verhält sich wie ein ruhendes Gas: Ihre Teilchen bewegen sich zufällig, ohne dass eine bestimmte Richtung ausgezeichnet wäre. Unser Sonnensystem fegt mit 220 Kilometern pro Sekunde durch diese Substanz. Außerdem umläuft die Erde mit 30 Kilometern pro Sekunde die Sonne. Wegen der Neigung dieser Umlaufbahn beträgt die Gesamtgeschwindigkeit des Fahrtwinds 235 Kilometer pro Sekunde, wenn auf der Nordhalbkugel Sommer herrscht, und im Winter 205 Kilometer pro Sekunde. Diese periodische Schwankung unterscheidet die Dunkle Materie vom Rauschhintergrund, der nicht mit den Jahreszeiten variiert.



DON DIXON

▷ Teilchenmasse und der geringen Kollisionswahrscheinlichkeit – fast exakt der astronomisch abgeleiteten Gesamtmasse der Dunklen Materie. Das ist ein starkes Indiz dafür, dass Neutralinos die gesuchten Kandidaten sind.

Um Dunkle Materie nachzuweisen, müssen die Teilchenforscher wissen, wie sie mit normaler Materie wechselwirkt. Nach Meinung der Astronomen spielt dabei nur die Schwerkraft eine Rolle – die schwächste aller Naturkräfte. Träfe das wirklich zu, wäre der Nachweis Dunkler Materie im Labor aussichtslos. Aber obgleich sich im kosmischen Maßstab nur die Schwerkraft bemerkbar macht, schließen die astronomischen Beobachtungen zumindest nicht aus, dass die Teilchen der Dunklen Materie auch ganz schwach auf andere Kräfte reagieren.

Nach den Theorien der Supersymmetrie unterliegt das Neutralino einer stärkeren Wechselwirkung als der Schwerkraft, nämlich der Schwachen Kernkraft – derselben, die gelegentlich auch Neutrinos verrät. Ein Strom von Neutralinos würde ein Stück Materie praktisch ohne Wechselwirkung durchdringen, doch dann und wann müsste eines dieser Gespensterteilchen doch einen Atomkern treffen und einen kleinen Teil seiner Energie auf den Kern übertragen.

Die Unwahrscheinlichkeit und Schwäche dieser Reaktion wird durch die gigantische Partikelzahl ein wenig wettgemacht. Immerhin soll die Galaxis größtenteils aus Dunkler Materie bestehen. Diese Materie konnte, »dunkel« wie sie ist, niemals durch Aussenden von Strahlung Energie verlieren und daher auch nie subgalaktische Klumpen wie Sterne und Planeten bilden. Stattdessen erfüllt sie noch immer den interstellaren Raum wie ein Gas. Unser Sonnensystem kreist mit 220 Kilometern pro Sekunde um das Zentrum der Milchstraße. Somit rasen wir in ziemlichem Tempo durch das unsichtbare Gas (siehe Kasten oben). Vermutlich strömt pro Sekunde eine Milliarde Dunkle-Materie-Teilchen durch jeden Quadratmeter.

Detektoren für Neutralinos

Dick Arnowitt von der Texas A&M University, John Ellis vom Europäischen Teilchenlabor Cern, Leszek Roszkowski von der University of Lancaster (England) sowie Vadim Bednyakov vom Kernforschungsinstitut JINR Dubna (Russland) und Hans V. Klapdor-Kleingrothaus vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg haben kürzlich die Wechselwirkung zwischen Neutralinos und normaler Materie möglichst umfassend berechnet. Sie wird üblicherweise als die Anzahl der Ereignisse pro Tag in einem Kilogramm normaler Materie angegeben. Je nach den theoretischen Details liegt das Resultat zwischen 0,0001 und 0,1 Ereignissen pro Kilogramm und Tag. Die derzeit laufenden Experimente vermögen Ereignishäufigkeiten am oberen Rand dieses Bereichs zu entdecken.

Das Hauptproblem ist nicht mehr die mangelnde Empfindlichkeit, sondern die Unreinheit der Detektoren. Wie jede irdische Materie enthält auch das Detektormaterial Spuren radioaktiver Elemente, etwa Uran und Thorium. Bei deren Zerfall entstehen Teilchen mit derselben Signatur wie Dunkle Materie – und die irdische Radioaktivität übersteigt das erhoffte Neutralino-Signal um das Millionenfache. Falls der Detektor über der Erde liegt, verschlechtert die kosmische Strahlung die Situation noch einmal um einen gleich großen Faktor. Wenn die Forscher Teilchen der Dunklen Materie mit einiger Sicherheit nachweisen wollen, müssen sie jede dieser Störquellen um das Millionenfache verringern.

Die Physiker stehen damit vor zwei Herausforderungen: Sie müssen die extrem schwache Wechselwirkung zwischen Dunkler und normaler Materie nachweisen und zugleich das starke Hin-

tergrundrauschen herausfiltern. Um das erste Problem zu lösen, muss der Rückstoß gemessen werden, den ein von einem Neutralino getroffener Atomkern erleidet. Dafür gibt es mehrere Verfahren. Im Prinzip besonders einfach ist der Nachweis der Erwärmung, die der Rückstoßkern in der umgebenden Materie erzeugt, wenn er unterwegs seine kinetische Energie an sie abgibt und ihre Temperatur geringfügig erhöht. Diese Erwärmung lässt sich nur entdecken, wenn das Material auf extrem geringe Ausgangstemperatur gekühlt wird. Das ist das Prinzip der kryogenen Detektoren.

Die kryogenen Detektoren der Suchprogramme CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) und Edelweiss vermögen sogar einzelne Phononen – Wärmequanten – im Material zu messen. Sie arbeiten bei 25 Millikelvin (tausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt) und verwenden empfindliche Halbleiter-Sensoren, so genannte Thermistoren, um den Temperaturanstieg in den verschiedenen Teilen des Apparats aufzuzeichnen. Die einzelnen Detektoren haben zwar nur eine Masse von wenigen hundert Gramm, aber die Forscher stapeln viele davon bis auf eine Gesamtmasse von mehreren Kilogramm, um das Signal zu verstärken. Die neueste Version von CDMS – angesiedelt in der Soudan-Mine im US-Bundesstaat Minnesota – soll Ende 2003 beginnen, Daten zu sammeln.

Die Nadel im Heuhaufen

Eine zweite Technik bedient sich der ionisierenden Wirkung des vom Neutralino angestoßenen Atomkerns: Der Rückstoßkern schlägt ein paar Elektronen aus benachbarten Atomen. In Germanium-Halbleiterdetektoren erzeugen diese Elektronen einen messbaren Strom. Dieser Effekt wird im Heidelberg-Moskau-Experiment (mit angereichertem Germanium-73), in der GENIUS Test Facility (GENIUS-TF), die am 5. Mai 2003 im Gran Sasso gestartet wurde, und im künftigen GENIUS-Projekt genutzt.

Ein drittes Verfahren nutzt die Anregung der vom Rückstoßkern erzeugten Ionen. Die angeregten Ionen – so genannte Excimere – fangen bald wieder ein Elektron ein und kehren in den Grundzustand zurück. In manchen Materialien, hauptsächlich in flüssigen Edelgasen wie Xenon, entstehen dabei Lichtblitze – so genanntes Szintillationslicht. Nach diesem Prinzip funktionieren übrigens die in der Augenheilkunde benutzten Excimer-Laser. Bei flüssigem Xenon ist das Licht sehr intensiv, und der Blitz dauert zehn Nanosekunden. Ein Photomultiplier kann ein solches Signal genügend verstärken, um es messbar zu machen.

Anfang der 1990er Jahre entwickelte das ZEPLIN-Projekt – unter Leitung von Hanguo Wang und mir an der University of California in Los Angeles sowie Pio Picchi an der Universität Turin (Italien) – Zweiphasen-Xenon-Detektoren. Diese Instrumente verstärken das Szintillationslicht durch eine Xenon-Gasschicht, die über dem flüssigen Xenon liegt und von einem elektrischen Feld durchzogen wird. Das Feld beschleunigt die von den Rückstoßkernen freigeschla- ▷

Die wichtigsten Suchprogramme

Projekt	Ort	Beginn	Detektortyp	Material	Masse in Kilogramm	Diskrimination
UKDMC	Boulby (England)	1997	Szintillation	Natriumiodid	5	keine
DAMA	Gran Sasso (Italien)	1998	Szintillation	Natriumiodid	100	keine
ROSEBUD	Canfranc (Spanien)	1999	kryogen	Aluminiumoxid	0,05	thermisch
PICASSO	Sudbury (Kanada)	2000	Tröpfchen	Freon	0,001	keine
SIMPLE	Rustrel (Frankreich)	2001	Tröpfchen	Freon	0,001	keine
DRIFT	Boulby (England)	2001	Ionisation	Schwefel-kohlenstoff	0,16	Richtung
Edelweiss	Frejus (Frankreich)	2001	kryogen	Germanium	1,3	Ionisation, thermisch
ZEPLIN I	Boulby (England)	2001	Szintillation	flüssiges Xenon	4	Zeit
HDMS	Gran Sasso (Italien)	2001	Ionisation	Ge-73	0,2	Zeit
CDMS II	Soudan (USA)	2003	kryogen	Silizium, Germanium	7	Ionisation, thermisch
ZEPLIN II	Boulby (England)	2003	Szintillation	flüssiges Xenon	30	Ionisation, Szintillation
GENIUS-TF	Gran Sasso (Italien)	2003	Ionisation	Germanium in flüssigem Stickstoff	10	keine
CRESST II	Gran Sasso (Italien)	2004	kryogen	Calcium-Wolframoxid	10	Szintillation, thermisch

DON DIXON / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

genen Elektronen und verwandelt dadurch eine Hand voll Partikel in eine Teilchenlawine. Fernziel ist ein Detektor aus zehn Tonnen flüssigem Xenon, der sogar sehr gering wechselwirkende Neutralinos nachweisen könnte.

Das Xenon braucht nicht flüssig zu sein. Manche Detektoren benutzen es in Gasform. Zwar hat Gas eine geringere Dichte, aber dafür ist die Spur des Rückstoßkerns darin leichter zu erkennen. Diese Spur gibt Auskunft über die Richtung, aus der die Dunkle Materie kommt, und kann damit ein zusätzliches Indiz liefern, dass es sich um ein galaktisches Neutralino handelt. Detektoren dieses Typs werden für die unterirdischen Labors in Boulby (England) entwickelt.

Xenon hat den Vorteil, keine natürlichen langlebigen radioaktiven Isotope zu besitzen, und erzeugt darum wenig Hintergrundrauschen. Außerdem lässt es sich leicht aus der Erdatmosphäre gewinnen; allerdings muss es von radioaktivem Krypton, einem Rückstand der Kernwaffentests, gesäubert werden. Doch Xenon ist nicht das einzige Szintillationsmaterial. Für das DAMA-Experiment im Gran-Sasso-Labor bei Rom wird Natriumiodid verwendet. Mit hundert Kilogramm Masse ist DAMA der derzeit größte Detektor der Welt.

Problem des Hintergrundrauschens

Um mit dem zweiten großen Problem – dem Hintergrundrauschen durch natürliche Radioaktivität und kosmische Strahlung – fertig zu werden, sind drei Schritte nötig. Erstens wird die kosmische Strahlung unterdrückt, indem die Forscher die Detektoren tief unter der Erdoberfläche platzieren und mit speziellen Abschirmungen umgeben. Zweitens wird das Detektormaterial gereinigt, um die radioaktive Kontaminierung zu verringern. Drittens konstruieren die Forscher spezielle Instrumente, die anhand verräterischer Signale die Dunkle Materie von anderen Teilchen unterscheiden können.

Da die ersten beiden Maßnahmen nicht ausreichen, verwenden die meisten Detektoren für Dunkle Materie ein gesondertes Diskriminationsverfahren, um die gesuchten Ereignisse von den übrigen zu unterscheiden. Ein erster Test ist die Suche nach einer jahreszeitlichen Variation des Signals. Wenn auf der Nordhalbkugel Sommer herrscht, sollte der Fluss Dunkler Materie höher sein, weil sich dann die Bewegung der Erde um die Sonne zur Bewegung des ganzen Sonnensystems durch die Milchstraße addiert; im Winter hingegen läuft die Erde gegen-

Drei Typen von Detektoren

ZEPLIN II

Szintillationsdetektor

Prinzip:
Sucht nach schwachen Lichtpulsen, die von Dunkler Materie ausgelöst werden – in diesem Fall in flüssigem Xenon.

Vorteile:
- Misst die Pulsform und vermag dadurch möglicherweise Dunkle Materie von gewöhnlicher zu unterscheiden.
- Misst mehrere Teilcheneigenschaften auf einmal.

ZEPLIN II, Innenansicht

CDMS II

Kryogendetektor

Prinzip:
Sucht nach schwachen Wärmepulsen, die beim Durchgang Dunkler Materie durch einen extrem tief gekühlten Kristall erzeugt werden.

Vorteile:
- Einfachheit
- hohe Empfindlichkeit für Teilchen niedriger Energie
- präzise Messung der Teilchenenergie

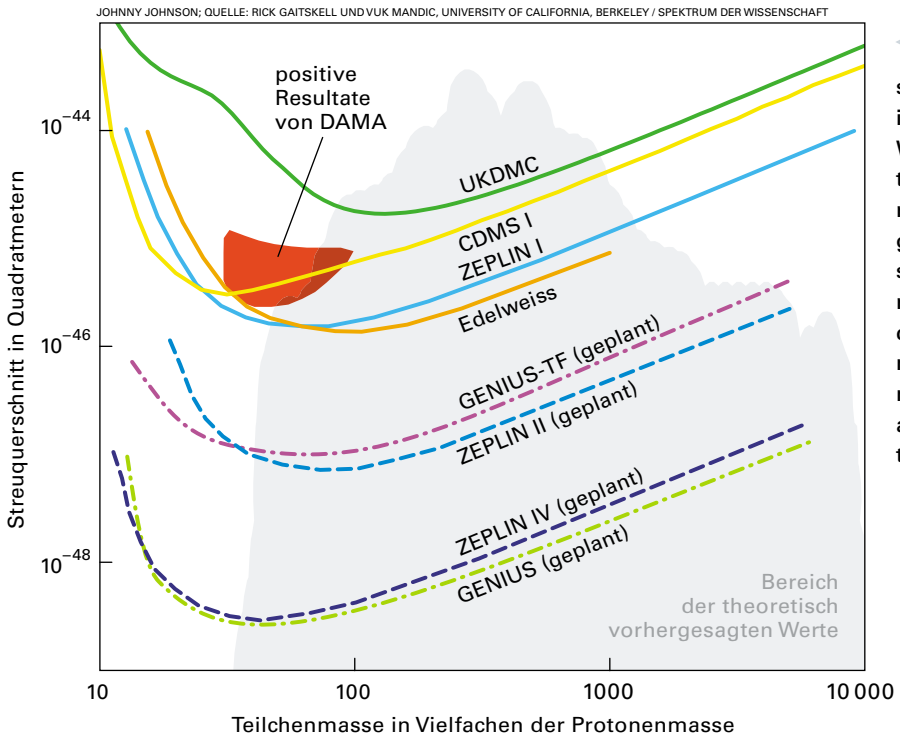
GENIUS-TF (seit Mai 2003 in Betrieb): Die ersten vier »nackten« Germanium-Kristalle

Ionisationsdetektor

Prinzip:
Sucht nach schwachen Strompulsen, die beim Durchgang Dunkler Materie durch eine Festkörper-Ionisationskammer erzeugt werden.

Vorteile:
- Einfachheit
- hohe Empfindlichkeit für Teilchen niedriger Energie
- präzise Messung der Teilchenenergie

MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON DAVID B. CLINE; ILLUSTRATION: ROY PREECE, DARK MATTER GROUP, RUTHERFORD APPLETON LABORATORY / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Die Eigenschaften Dunkler Materie müssten theoretisch in dem grau schattierten Bereich liegen. Im Diagramm ist der Streuquerschnitt – ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass die Dunkle-Materie-Partikel mit gewöhnlicher Materie reagieren – gegen die Partikelmasse aufgetragen. Detektoren decken einen wachsenden Teil des theoretisch möglichen Bereichs ab; die farbigen Kurven markieren die Grenzen ihrer Empfindlichkeit. Die meisten haben bisher nichts entdeckt; nur DAMA fand – umstrittene – Hinweise auf Dunkle Materie mit eng eingeschränkten Eigenschaften (roter Bereich).

sinnig, ihre Bewegung wird von der des Sonnensystems subtrahiert (siehe Kasten Seite 48). Die Signalschwankung könnte mehrere Prozent ausmachen.

Die fortschrittlichsten Projekte benutzen einen Sekundärdetektor, der nach einem anderen Prinzip arbeitet als der Primärdetektor und auf unterschiedliche Teilchentypen etwas anders reagiert. Zum Beispiel verursachen Teilchen des Störhintergrunds meist mehr Ionisation als ein Atomkern, der von einer Neutralino-Kollision weggestoßen wird. Durch Kombinieren von zwei Detektoren lässt sich dieser Unterschied aufspüren.

Ein einsamer Ausreißer

Seit Ende der 1980er Jahre wird mit den hier beschriebenen Methoden systematisch nach Signalen der Dunklen Materie gesucht. Alle Experimente – mit einer einzigen Ausnahme – haben bislang nur Nullresultate geliefert. Das ist kein Wunder, denn sie erreichen erst seit kurzem die nötige Empfindlichkeit und Rauschtoleranz. Die einsame Ausnahme ist DAMA: Vor vier Jahren meldete dieses Projekt die Beobachtung einer jahreszeitlichen Schwankung, doch in der Fachwelt hielten sich Aufregung und Skepsis die Waage. Das Problem ist, dass DAMA keine Mehrfachdetektoren zur Diskrimination zwischen Signal und Rauschen verwendet. Drei andere Experimente mit Mehrfachdetektoren haben das DAMA-Resultat seither in Frage gestellt: Edelweiss, ZEPLIN I und CDMS I untersuchten praktisch denselben Parameterbereich wie DAMA und fanden nichts. Das CDMS-I-Team behauptet, das Nullresultat sei zu 98 Prozent zuverlässig. Wenn weitere Projekte ebenfalls nichts finden, müssen die DAMA-Forscher ihr Signal wohl auf radioaktive Prozesse oder andere Störeinflüsse zurückführen. Die Detektoren der nächsten Generation sollten in der Lage sein, die Existenz von Neutralinos eindeutig nachzuweisen oder auszuschließen. Wenn sie gar nichts finden, kann Supersymmetrie nicht die Erklärung für Dunkle Materie sein. Die Theoretiker würden sich anderen, weniger attraktiven Hypothesen zuwenden müssen. Doch falls die Detektoren ein Signal nachweisen, wäre das eine der größten Errungenschaften des 21. Jahrhunderts.

Die spektakulärste Konsequenz wäre gewiss die Enthüllung der geheimnisvollen Substanz, die ein Viertel der Masse des Universums ausmacht; offen bliebe nur noch das Wesen der Dunklen Energie. Ein solcher Durchbruch würde weitere Entdeckungen nach sich ziehen. Wenn die Detektoren Teilchen der Dunklen Materie aufspüren könnten, wären Teilchenbeschleuniger wie der Large Hadron Collider bei Cern vielleicht fähig, sie auch künstlich zu erzeugen und mit ihnen zu experimentieren. Die Bestätigung der Supersymmetrie würde bedeuten, dass Scharen neuer Teilchen der Entdeckung harren; zugleich würde die String-Theorie gestützt, in der die Supersymmetrie eine zentrale Rolle spielt. Kein Wunder, dass Teams in aller Welt begierig sind, eines der größten Geheimnisse der modernen Astrophysik bald zu lösen. ◁

David B. Cline ist Professor für Physik an der Universität von Kalifornien in Los Angeles. Er hat Neutrinos hoher Energie erforscht, den Zerfall des Protons sowie die W- und Z-Bosonen, die Träger der Schwachen Kernkraft. Derzeit sucht er am CMS-Detektor beim Europäischen Teilchenlabor Cern nach Dunkler Materie.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

New Light on Dark Matter. Von J. P. Ostriker und P. Steinhardt in: Science, Bd. 300, S. 1909 (2003).

Dark Matter in Astro- and Particle Physics. Von Hans V. Klapdor-Kleingrothaus und Raoul D. Viollier (Hg.). Springer Verlag, 2002.

Sources and Detection of Dark Matter and Dark Energy in the Universe. Von David B. Cline (Hg.). Springer Verlag, 2001.

Quintessence: The Mystery of the Missing Mass. Von Lawrence M. Krauss. Basic Books, 2001.

Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape the Universe. Von Martin J. Rees. Basic Books, 1999.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Zensur in der Zelle

Zu ihrer Überraschung entdeckten Biologen, dass Tier- und Pflanzenzellen unerwünschte Gene zum Schweigen bringen können, indem sie deren RNA-Kopien zerschnipseln. Biotechnologiefirmen sind schon dabei, diesen vielseitigen Regulationsmechanismus für medizinische Zwecke zu nutzen.

Von Nelson C. Lau und David P. Bartel

Unter dem Mikroskop macht eine lebende Zelle einen ausgesprochen ruhigen, ja friedlichen Eindruck. Doch in ihrem Inneren herrscht hektisches biochemisches Treiben. Das Erbgut jeder tierischen und pflanzlichen Zelle enthält Tausende von Genen. Sich selbst überlassen, würde die Transkriptionsmaschinerie ihnen allen gleichzeitig Geltung verschaffen. Dazu entwindet sie die wendeltreppenartige DNA-Doppelhelix, trennt sie in die beiden Einzelstränge auf und fertigt von jedem Gen eine Abschrift in Form einer Boten-RNA an (Transkription). Diese Blaupause – im Wesentlichen eine Anleitung zum Aneinanderhängen von Aminosäuren in einer bestimmten Reihenfolge – wird dann an den Ribosomen in das entsprechende Protein übersetzt (Translation).

Wenn das mit allen Genen gleichzeitig geschähe, bräche das Chaos aus. Deshalb betätigt sich die Zelle als Zensor: Sie verpasst den meisten Genen einen Maulkorb und sorgt dafür, dass nur die jeweils benötigten abgelesen werden. Zu diesem Zweck enthält die DNA Abschnitte mit Regulatorfunktion. Von einem Gen werden nur dann RNA-Abschriften gemacht, wenn sich an eine solche regulatorische DNA-Region in seiner Nähe ein aktivierender Proteinkomplex angelagert hat.

Gefährliche Gene

Doch dieser Schutzmechanismus allein genügt der Zelle noch nicht. Manche untergeschobenen Gene – sei es, dass sie sich schon vor langer Zeit ins Erbgut eingeschlichen haben oder gerade erst von Eindringlingen frisch eingeschleppt wurden – enthalten nämlich die Bauanleitung für so gefährliche Proteine, dass sie nie und nimmer die Möglichkeit erhalten dürfen, aktiv zu werden. Das gilt etwa für mobile genetische Elemente, die im Genom von Ort zu Ort springen, wenn die Zelle sie exprimiert (das darin codierte Protein herstellt). Krebs oder andere Krankheiten können die Folge sein. Ebenso gefährlich sind Viren. Wenn ihre genetische Botschaft nicht abgefangen wird, bemächtigen sie sich der Proteinsynthesemaschinerie der Zelle und zwingen sie, virale Proteine herzustellen – mit schädlichen bis verheerenden Wirkungen für den Organismus.

Doch die Zellen wissen sich zu wehren. So wurde schon vor längerer Zeit das Interferon-System entdeckt. Es tritt in Aktion, wenn virale Gene in eine Säugetier-Zelle gelangen. Mit brachialer Gewalt unterbindet es dann jegliche Genexpression, als würden in einer Druckerei die Rotationsmaschinen angehalten.

In den letzten Jahren entdeckten Forscher jedoch einen wesentlich präziseren Sicherheitsmechanismus, der zudem erheblich mehr Anwendungsmöglichkeiten für Forschung und Medizin bietet. Dieses als RNA-Interferenz (RNAi) bezeichnete System findet sich bei praktisch allen tierischen und pflanzlichen Zellen. Es bringt gefährliche Gene zum Schweigen – Wissenschaftler sprechen deshalb von »Silencing« –, indem es gezielt nur ihre Boten-RNA abfängt und zerstört.

Mit wachsender Einsicht in die Funktionsweise und den Auslösemechanismus dieses zellulären Stummschalters stieg die Begeisterung der Biologen. Erkannten sie doch, dass er die Möglichkeit bot, auf

sehr einfache Art die Expression von Genen zu unterbinden, die an der Entstehung von Krebs, Virus-Infektionen oder anderen Krankheiten beteiligt sind. Damit zeichnete sich eine ganz neue Art von hochwirksamen Medikamenten ab.

Tatsächlich ist es Wissenschaftlern, die mit Pflanzen, Würmern, Fliegen und anderen Modellorganismen arbeiten, inzwischen gelungen, mittels RNA-Interferenz die Expression praktisch jedes beliebigen Gens zu unterdrücken und so Informationen über seine Funktion zu gewinnen. Als Instrument der Forschung ist die RNAi also ein durchschlagender Erfolg. Hunderte von Labors können damit heute Probleme angehen, vor denen sie noch vor wenigen Jahren kapitulieren mussten.

Während die meisten Forschungsgruppen die RNA-Interferenz in dieser Weise als bloßes Hilfsmittel nutzen, suchen andere die Feinheiten ihrer Funktionsweise zu ergründen. Wieder andere (darunter auch wir) gehen der Frage nach, welche Rolle die RNA-Interferenz im Zuge der normalen Entwicklung von Pflanzen, Pilzen, Tieren und Menschen spielt.

Erste Hinweise auf dieses Phänomen tauchten vor 13 Jahren auf. Richard A. Jorgensen, inzwischen an der Universität von Arizona in Tucson, hatte in das Erbgut von violett blühenden Petunien weitere Exemplare des Gens für die Synthese des natürlichen Blütenfarbstoffs Anthocyan eingebaut. Er erhoffte sich davon eine noch intensivere Färbung. Doch das Gegenteil war der Fall: Die Blüten erschienen blasser und waren stellenweise völlig ausgebleicht (siehe Seite 54). Über ähnliche Beobachtungen berichtete Joseph Mol von der Freien Universität Amsterdam.

Beide schlossen aus diesem verblüffenden Befund, dass die zusätzlichen Genkopien auf noch unbekannte Weise die Suppression sämtlicher Farbstoffsynthese-Gene veranlassten, auch der natürlich vorhandenen. So entstanden die blassen, weißgefleckten oder sogar völlig farblosen Blüten. Eine derartige gemeinsame Unterdrückung – Co-Suppression – eines eingefügten Gens und seines natürlichen Gegenstücks beschrieben in der Folge James A. Birchler von der Universität von Missouri in Columbia und Giuseppe Macino von der Universität Rom auch bei Taufliegen und Pilzen.

Erste Hinweise, wie dieser neuartige Effekt zu Stande kam, fand einige Jahre später die Arbeitsgruppe von William G. Dougherty an der Staatsuniversität von Oregon in Corvallis. Sie arbeitete mit Tabakpflanzen, in deren Erbgut mehrere Exemplare des Gens für das Hüllprotein CP des Tabakätz-Virus eingefügt worden waren. Brachte man sie mit dem Virus in Kontakt, erwiesen sich einige als immun dagegen. Dougherty schrieb dies einer Co-Suppression zu. Die Pflanzen unterdrückten anscheinend die Aktivität der eingeführten fremden CP-Gene. Folglich blockierten sie deren Expression auch in eindringenden Viren, sodass sich die Invasoren nicht in ihnen vermehren konnten. Wie Doughertys Arbeitsgruppe weiterhin zeigte, setzte die Immunität nicht voraus, dass die Pflanzen das Hüllprotein wirklich produzierten. Demnach musste irgendein Vorgang auf der Ebene der Boten-RNA die Resistenz gegen das Virus verursachen.

JANA BRENNING

IN KÜRZE

- Schon seit längerem lassen sich problemlos **fremde oder modifizierte eigene Gene** in Lebewesen einschleusen. Doch erst in den letzten Jahren entdeckten Biologen eine einfache und effiziente Methode, gezielt natürlich vorhandene Gene vorübergehend abzuschalten.
- Wie sich zeigte, enthalten fast alle pflanzlichen und tierischen Zellen ein System, das die RNA-Abschriften von **potenziell schädlichen Genen** abfängt und zerstört, bevor sie in Proteine übersetzt werden können.
- Diese so genannte **RNA-Interferenz** hat sich in der Evolution für einen doppelten Zweck herausgebildet: Sie schützt Zellen vor den Produkten gefährlicher Fremdgene und reguliert die Aktivität normaler zellulärer Gene im Verlauf von Wachstum und Entwicklung. Der Mechanismus lässt sich aber auch für **neuartige Medikamente** zur Behandlung oder Vorbeugung von Erkrankungen nutzen.

Unerklärliches Schweigen

Außerdem stellten Dougherty und seine Mitarbeiter fest, dass nicht nur Pflanzen bestimmte Gene von Viren blockieren können, sondern auch umgekehrt Viren einzelne Gene von Pflanzen. In manchen Fällen unterdrückte die Tabakpflanze die eingeführten CP-Gene nämlich zunächst nicht. Folglich wurde sie von dem Virus befallen, das sich munter in ihren Zellen vermehrte. Als die Forscher jedoch später die Menge der CP-Boten-RNA maßen, fanden sie fast nichts: Offenbar hatte die Infektion also schließlich doch noch eine Inaktivierung der CP-Gene bewirkt.

Etwa zur selben Zeit lieferten Versuche anderer Biologen, mit »Antisense«-RNA gezielt Gene in dem kleinen, durchsichtigen Fadenwurm (Nematoden) *Caenorhabditis elegans* auszuschalten, verwirrende Resultate. Antisense-RNA ist so konstruiert, dass sie sich mit einer be- ▷

stimmten Boten-RNA (dem zugehörigen »Sense«-Molekül) zu einem Doppelstrang zusammenlagert – genau wie zwei komplementäre DNA-Fäden eine Doppelhelix bilden. Alle Nucleinsäuren bestehen aus aneinander gereihten Bausteinen, die mit den Buchstaben A, C, G und U (im Fall der RNA) oder T (bei DNA) bezeichnet werden. C paart sich bei der Doppelstrangbildung immer mit G, A hingegen mit U beziehungsweise T. Entsprechend bindet sich die einzelsträngige Antisense-RNA an Boten-RNA mit passender, komplementärer Sequenz. Dabei entsteht eine partiell doppelsträngige Struktur, die nicht in ein korrektes Protein übersetzt werden kann.

Über die Jahre waren Experimente mit Antisense-RNAs in verschiedenen Organismen nur hier und da erfolgreich gewesen. Bei den Fadenwürmern jedoch schien die Methode zuverlässig zu funktionieren. Aber dann gab es einen verblüffenden Befund: Auch Sense-RNA war fähig, die Genexpression zu unterbinden, obwohl sie die gleiche Sequenz wie die Boten-RNA des Zielgens hatte und diese daher nicht durch Paarung abfangen konnte.

Damit war der Boden bereitet für das entscheidende Experiment, das die Wissenschaftler um Andrew Z. Fire von der Carnegie Institution in Washington und Craig C. Mello von der Universität von Massachusetts in Worcester vor fünf Jahren durchführten. Fire und Mello vermuteten, dass die bei den früheren Versuchen verwendeten Antisense- und Sense-RNAs nicht ganz sauber waren. Ihrer Ansicht nach enthielten beide Präparationen Spuren von doppelsträngiger RNA. Diese hätte dann die Inaktivierung ausgelöst.

Um ihre Vermutung zu testen, injizierten die Forscher den Fadenwürmern entweder einzelsträngige oder doppelsträngige RNA-Abschriften – jeweils in absolut reiner Form – von einem Gen namens *unc-22*, das für die Muskelfunktion eine wichtige Rolle spielt. Selbst größere Mengen einzelsträngiger Botenmoleküle, ob in der Sense- oder Antisense-Form, hatten kaum Einfluss auf das Verhalten der Würmer. Doch nach Injektion nur weniger Exemplare der doppelsträngigen Variante begannen die Tiere und sogar ihre Nachkommen unkoordiniert zu zucken – ein unmissverständliches Zeichen, dass die Funktion von *unc-22* gestört war. Dieselbe erstaunlich effektive Blockade beobachteten Fire und Mello bei jedem Gen, dem sie auf diese Weise zu Leibe rückten – unter anderem auch bei solchen, die mit der Fortpflanzung und Vitalität der Würmer zu tun hatten. Sie nannten das Phänomen RNA-Interferenz.

In der Folge konnten Wissenschaftler den Abschalt-Effekt bei Pflanzen und Pilzen auf dieselbe Ursache zurückführen. Zugleich fanden sie heraus, dass RNA-Stränge, die sich zurückbiegen und dann mit sich selbst zu einem längeren Doppelstrang verbinden können, ebenfalls in der Lage sind, das zugehörige Gen zu unterdrücken. Andere Untersuchungen wiederum ergaben, dass Co-Suppression nur auftritt, wenn die Zelle über ein Gen verfügt, das sie befähigt, einzelsträngige in doppelsträngige RNA umzuwandeln.

RICHARD A. JORGENSEN, UNIVERSITY OF ARIZONA

Petunien lieferten die ersten Hinweise auf eine Zensur genetischer Botschaften in Pflanzen, die heute als RNA-Interferenz bezeichnet wird. Nach dem künstlichen Einfügen zusätzlicher Exemplare des Gens für die Synthese des Farbstoffs Anthocyan waren die Blüten erstaunlicherweise nicht etwa intensiver gefärbt, sondern blasser, und enthielten sogar weiße Bereiche (Mitte und unten).

Demnach erkannten die Petunien von Jorgensen und Mol über einen noch unbekannten Mechanismus die zusätzlichen Farbstoffsynthese-Gene als verdächtig und überführten deshalb die zugehörige Boten-RNA in die doppelsträngige Form. Diese brachte dann sowohl die eingeschleusten als auch die natürlich vorhandenen Gene zum Verstummen.

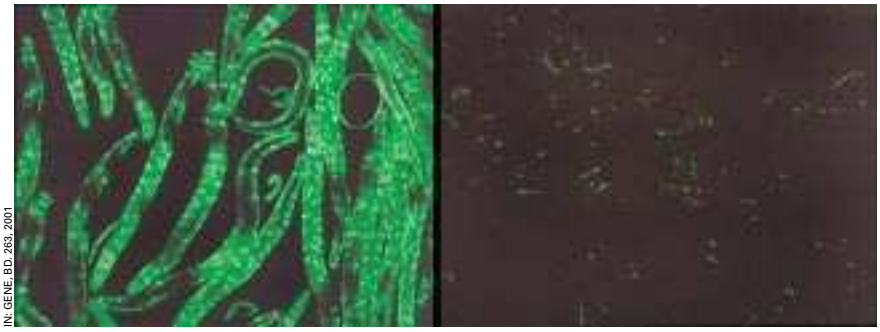
Das Konzept der RNA-Interferenz erklärte auch, warum die Virus-Infektion die CP-Gene in Doughertys Pflanzen abschaltete. Das Tabakätz-Virus erzeugte bei seiner Vermehrung doppelsträngige RNA von seinem gesamten Genom, wie das viele Viren tun. Als Reaktion darauf fing die Pflanze die Boten-RNAs aller viralen Gene ab und damit auch diejenigen der eingeschleusten CP-Gene.

Doppelsträngige RNA – gestückelt und zerschnipselt

Die Biologen konnten kaum fassen, dass sie ein derart effizientes und praktisch allgegenwärtiges System der Genregulation so lange übersehen hatten. Nun, da es entdeckt war, stürzten sie sich aber mit Feuereifer darauf und bemühten sich, nicht nur seinen Funktionsmechanismus aufzuklären, sondern auch sinnvolle Einsatzmöglichkeiten dafür zu finden.

Bald wurde die RNA-Interferenz auch in Algen, Plattwürmern und Taufliegen beobachtet. Insgesamt war sie damit in vielen stammesgeschichtlich weit voneinander entfernten Organismen dokumentiert. Dagegen stellte es sich als schwierig heraus, sie bei Säugetieren einschließlich Mensch nachzuweisen – Voraussetzung für ihre Anwendung in der Medizin.

Wird eine menschliche Zelle von einem Virus infiziert, das bei der Replikation lange doppelsträngige RNAs synthetisiert, so zieht sie in der Regel die Notbremse und organisiert eine Totalblockade: In einer konzertierten Aktion unterbindet ein Enzym namens Proteinkinase R die Translation sämtlicher Boten-RNAs, normaler wie viraler, während das Enzym RNAse L sie reihum zerstört. Diese Maßnahmen gelten als Teil der so genannten Interferon-Antwort, weil sie in Gegenwart dieses Botenstoffs, den Zellen als



LISA TIMMONS, UNIVERSITY OF KANSAS; TIMMONS ET AL. IN: GENE, BD. 263, 2001

Fadenwürmer waren die ersten Tiere, bei denen sich die RNA-Interferenz nachweisen ließ. Nach Übertragung des Gens für ein fluoreszierendes Protein leuchteten sie (links). Die Injektion doppelsträngiger RNA der entsprechenden Sequenz ließ die Fluoreszenz jedoch verschwinden (rechts).

Warnsignal für ihre Nachbarn ausscheiden, schneller ergriffen werden.

Immer wenn Wissenschaftler also künstliche doppelsträngige RNAs, wie sie zur Untersuchung der RNAi bei Würmern und Fliegen verwendet wurden, in die Zellen erwachsener Säugetiere einbrachten, ließ diese Abwehrreaktion unterschiedslos jedes Gen verstummen. Es wollte einfach nicht gelingen, den störenden Interferon-Alarm zu vermeiden.

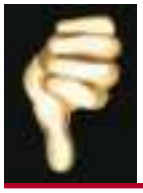
Der entscheidende Trick wurde erst entdeckt, nachdem der Funktionsmechanismus der RNA-Interferenz genauer ergründet war. Außer den schon erwähnten Pionieren auf dem Gebiet leisteten Thomas Tuschl von der Rockefeller-Universität in New York (damals noch am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen), Philipp D. Zamore von der Universität von Massachusetts und Gregory Hannon vom Laboratorium Cold Spring Harbor (US-Bundesstaat New York) dabei wesentliche Beiträge.

Wie ihre Untersuchungen ergaben, verfügen Zellen über ein Enzym namens Häcksler (Dicer), das doppelsträngige RNA normaler Länge in Fragmente zerschneidet: so genannte kleine interferierende RNAs (siRNAs). Diese sind einheitlich etwa 22 Nucleotidbausteine lang.

Dicer durchtrennt die beiden Stränge der langen RNA an etwas versetzten Stellen, sodass an den Enden jeweils zwei Nucleotide überstehen. Jede siRNA wird dann in die beiden Einzelstränge zerlegt und einer davon in einen Verbund aus mehreren Proteinen eingefügt: den RNA-induzierten Silencing Complex (RISC).

Dort ist das siRNA-Molekül so angeordnet, dass es in Kontakt mit Boten-RNAs im Cytoplasma der Zelle treten kann. Unter den tausenden verschiedenen Varianten, denen es dabei begegnet, fischt es jedoch ausschließlich solche heraus, die eine Sequenz enthalten, welche exakt oder weitgehend komplementär zu seiner eigenen ist. Anders als das Interferon-System arbeitet der Silencing-Komplex also hochselektiv und schnappt sich nur ganz bestimmte Boten-RNAs.

Sobald er ein passendes Exemplar gepackt hat, schneidet er es mit Hilfe eines Enzyms namens Hobel (Slicer) in der Mitte durch. Die beiden Hälften, die nicht mehr zur Proteinsynthese taugen, lässt er wieder los. Danach macht er Jagd auf weitere Opfer. Das RNAi-System nutzt also einzelsträngige Bruchstücke der doppelsträngigen RNAs, um eine schwarze Liste von Boten-RNAs zu erstellen, die erkannt und vernichtet werden sollen.



Schon wenige Moleküle der doppelsträngigen RNA ließen die Würmer – und sogar ihre Nachkommen – unkoordiniert zucken

Ein Traum wird wahr

David C. Baulcombe und seine Mitarbeiter am Sainsbury-Laboratorium in Norwich (England) konnten als Erste siRNAs in Pflanzen nachweisen. Das Team von Tuschl isolierte sie später auch aus Taufliegen-Embryonen. Zugleich bewies es deren Rolle beim Abschalten von Genen, indem es künstliche siRNAs herstellte und sie zur gezielten Zerstörung zellulärer Boten-RNAs einsetzte.

Als das bei den Fliegen problemlos gelang, fragte sich Tuschl, ob diese kurzen RNA-Schnipsel vielleicht durch die Maschen des Interferon-Systems schlüpfen könnten, das Doppelstrang-RNAs aus weniger als dreißig Basenpaaren normalerweise ignoriert. Also brachten er und seine Mitarbeiter synthetische siRNAs in Säugerzellen ein. Der Versuch war ein voller Erfolg: Die Expression der Zielgene wurde unterdrückt, und die Interferon-Antwort blieb aus (Spektrum der Wissenschaft 10/2001, S. 15).

Dieses Ergebnis schlug in der biomedizinischen Fachwelt ein wie eine Bombe. Zwar war es schon seit längerem keine Kunst mehr, Fremdgene in Säugetiere einzuschleusen – beispielsweise mit Viren als Vehikeln. Doch wollte man ein Gen ausschalten, um seine Funktion aufzuklären, erforderte das monatelange mühselige Arbeit. Auf einmal war der Traum, beliebige Gene in Säugerzellen rasch und gezielt zu unterdrücken, Wirklichkeit geworden. Mit siRNAs gelingt das innerhalb weniger Stunden – auch in menschlichen Zellen. Und der Effekt hält mehrere Tage an – lange genug für die meisten Experimente.

So nützlich die RNA-Interferenz für genetische Untersuchungen an Säugerzellen geworden ist, hat sie sich bei der Arbeit mit weniger hoch entwickelten Lebewesen allerdings als noch wertvoller erwiesen. Bei Fadenwürmern und Pflanzen breitet sich der Silencing-Effekt nämlich von der Stelle, an der die doppelsträngige RNA eingebracht wurde, bis in die entlegensten Winkel des Organismus aus. Auf Grund dieser systemischen Wirkung braucht man Nematoden nur mit genetisch veränderten Bakterien zu füttern, die doppelsträngige RNA des Ziel-Gens erzeugen, um dieses abzuschalten.

Alles in allem kommt die RNA-Interferenz genau zur rechten Zeit. Nun, da das Erbgut vieler Organismen – einschließlich des Menschen – komplett entziffert wurde, stehen die Biologen vor der nicht weniger anspruchsvollen Aufgabe, auch die Funktion der zahllosen neu entdeckten Gene zu bestimmen. Da die RNA-Interferenz so wirkungsvoll und so leicht auszulösen ist, bietet sie sich als ideales Mittel dazu an. Mit ihr kann man in kürzester Zeit ohne großen Aufwand sys- ▷

▷ tematisch ein Gen nach dem anderen ausschalten und nachsehen, welche Prozesse dadurch jeweils beeinträchtigt werden.

Genau das haben vor kurzem vier Arbeitsgruppen in Tausenden paralleler Experimente bei *C. elegans* gemacht. Analoges geschieht derzeit bei Pflanzen wie der Ackerschmalwand, und mehrere kooperierende Teams planen große RNAi-Projekte bei Säugerzellen.

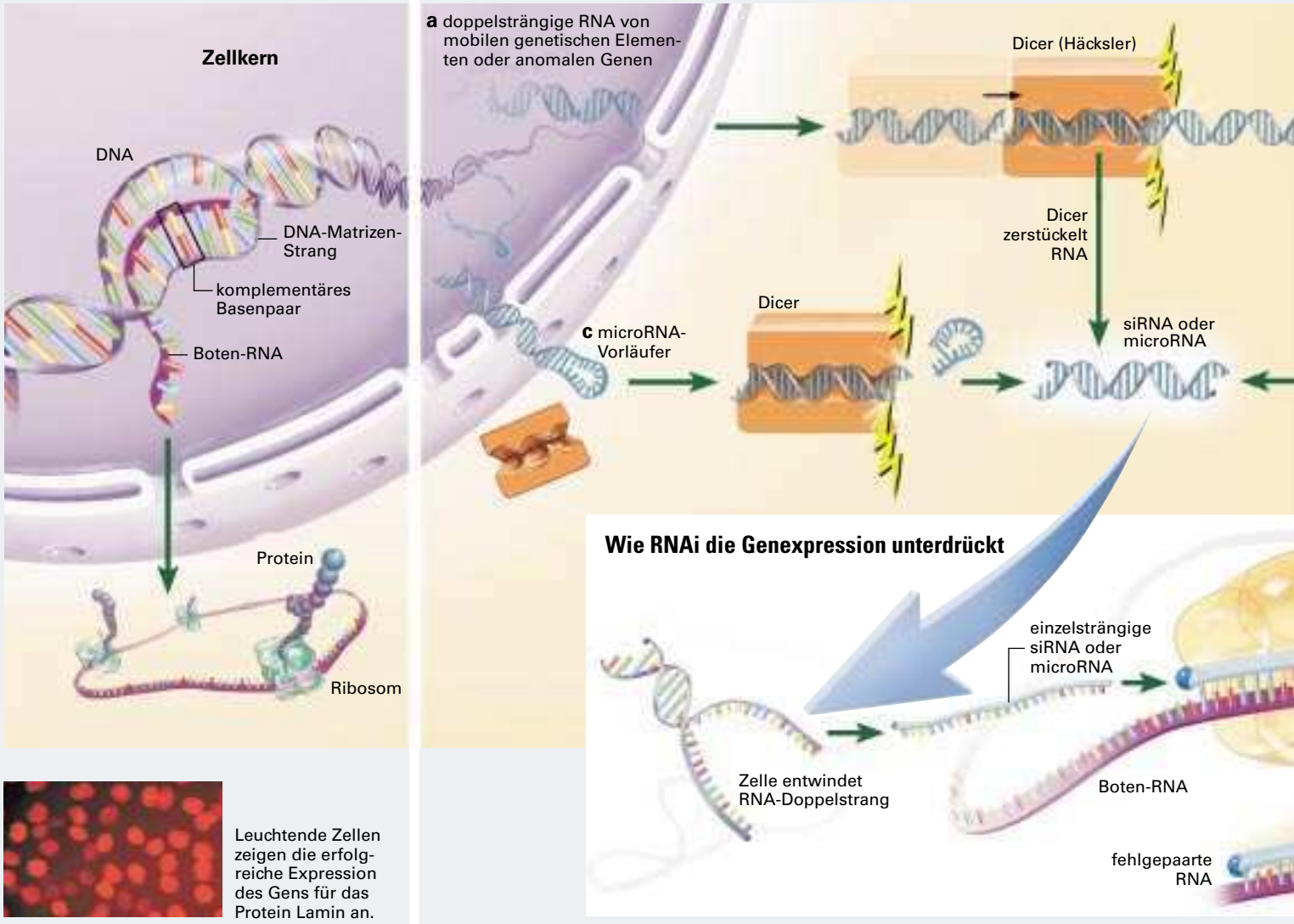
Enthusiasmus in der Pharmabranche

Auch die pharmazeutische Industrie hat die RNA-Interferenz begierig aufgegriffen. In der Medikamentenentwicklung wird das Stummschalten etwa dazu verwendet, ein ganzes Sortiment von Genen auf einmal nach aussichtsreichen Ansatzpunkten für neuartige Behandlungsmethoden zu durchmustern. So könnte es durch systematisches RNAi-Silencing etwa gelingen, ein Gen aufzuspüren, das in bestimmten Krebszellen unbedingt aktiv sein muss, in normalen Zellen dagegen nicht. Damit bestünde die Möglichkeit, einen Wirkstoff zu entwickeln, der die Funktion des entsprechenden Proteins hemmt, um ihn dann auf seine Eignung als Krebsmedikament zu testen. Einige neu gegründete Biotechnologiefirmen bauen sogar darauf, dass die RNA-Interferenz selbst bereits dazu dienen kann, Krebs, Virus-Infektionen, bestimmte dominant vererbte Störungen und andere Krankheiten zu behandeln, die von krank machenden Genen herrühren.

Zahlreiche Publikationen aus jüngster Zeit unterstreichen das therapeutische Potenzial dieser Methode. Mindestens sechs Teams, darunter das von Philip A. Sharp am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, konnten durch RNA-Interferenz die Ausbreitung von Viren – unter anderem die Erreger von Aids, Kinderlähmung und Hepatitis C – in Kulturen menschlicher Zellen zumindest zeitweise unterbinden. Das gelang, indem die Forscher mit künstlichen siRNAs die Produktion viraler Proteine hemmten, die für die Vermehrung der Krankheitserreger unentbehrlich sind.

Ähnliche Erfolge bei lebenden Säugetieren meldeten die Gruppen um Judy Lieberman von der Harvard-Universität in Boston und Mark Kay von der Universität Stanford (Kalifornien). Sie konnten zeigen, dass unter sehr hohem Druck inji-

Wie Gene einen Maulkorb verpasst bekommen



Leuchtende Zellen zeigen die erfolgreiche Expression des Gens für das Protein Lamin an.

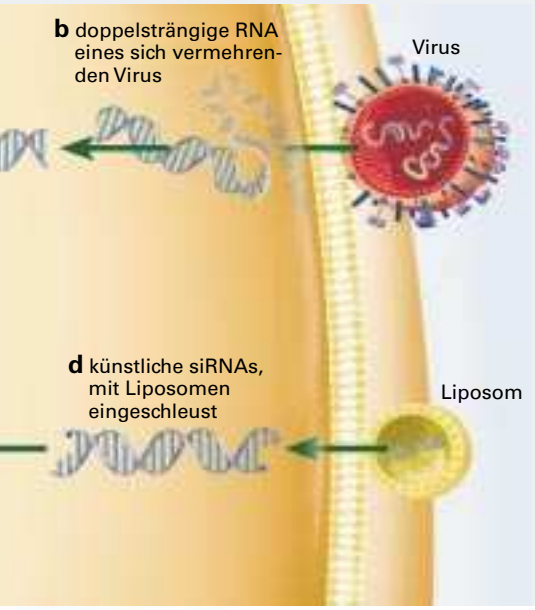
zierte siRNAs eine Hepatitis-Infektion bei Mäusen milder verlaufen lassen. Dadurch überlebten viele Tiere, die sonst an der Leberentzündung gestorben wären.

Trotz dieser ermutigenden Ergebnisse wird es aber noch einige Jahre dauern, bis Behandlungen auf RNAi-Basis beim Menschen spruchreif sind. Der schwierigste Aspekt dürfte die Frage sein, wie sich die siRNAs am besten und präzisesten an ihren Wirkort bringen lassen. Während sich ihr hemmender Effekt auf das betreffende Gen bei Fadenwürmern und Pflanzen über den gesamten Organismus ausbreitet, scheint das bei Menschen und anderen Säugern nicht zu passieren. Außerdem sind siRNAs im Vergleich zu üblichen pharmazeutischen Wirkstoffen sehr groß. Folglich können sie nicht als Tabletten eingenommen werden, da sie im Magen-Darmtrakt verdaut statt resorbiert werden. Derzeit erproben Forscher diverse Methoden, siRNAs an mehrere Organe gleichzeitig zu verabreichen und sie durch die Außenmembran von Zellen zu lotsen. Aber noch ist unklar, ob eine davon funktioniert.

Einen anderen Ansatz zur Lösung dieses Problems bietet die Gentherapie. Man könnte ein künstliches Gen mit der Bauanleitung für eine bestimmte siRNA in ein ungefährliches Virus einsetzen, das es dann in die infizierten Zellen einschleppt. Die Gruppe um Beverly Davidson an der Universität von Iowa in Iowa City benutzt zum Beispiel ein modifiziertes Adenovirus, um Gene, die siRNAs produzieren, in Gehirn und Leber von Mäusen einzuschleusen. Jede Art von Gentherapie am Menschen wirft jedoch technische und ethische Probleme auf.

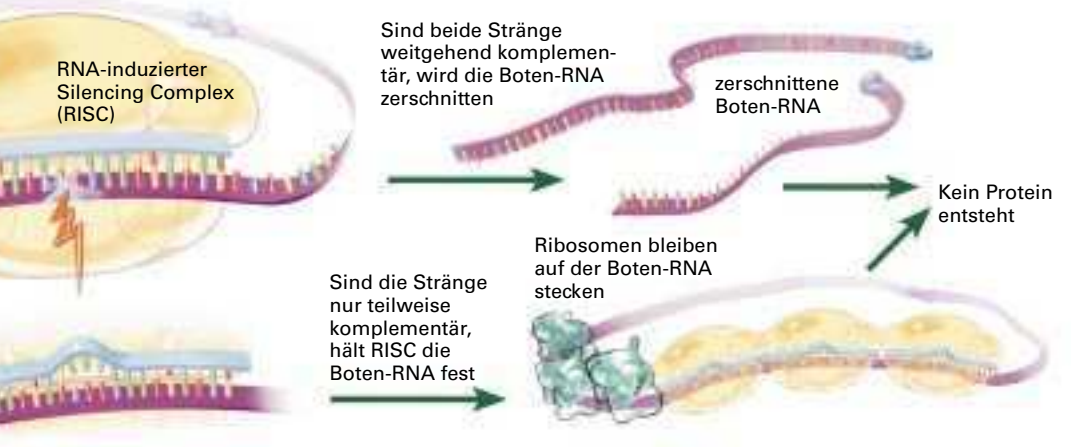
Trotz der Schwierigkeiten mit der Verabreichung herrscht, was die therapeutischen Möglichkeiten der siRNAs betrifft, ein Enthusiasmus, der bei Antisense- und katalytischen RNAs, die einst auch als Wundermittel zum Abfangen schädlicher Boten-RNAs galten, mittlerweile verflogen ist. Die hohen Erwartungen beruhen zum Teil darauf, dass die RNA-Interferenz der natürliche zelleigene Mechanismus zum Stummschalten von Genen ist und als solcher in Jahrmillionen evolutionärer Erprobung perfektioniert wurde.

Tatsächlich dürfte das RNAi-System sogar schon vor rund einer Milliarde Jahren entstanden sein. Damals entwickelte ▷



Eine Zelle kann die Expression eines Gens unterdrücken, indem sie dessen Boten-RNA abfängt. Dadurch verhindert sie deren Übersetzung in ein Protein, die üblicherweise an den Ribosomen stattfindet. Ausgelöst wird die Blockade durch kleine doppelsträngige RNA-Moleküle mit überstehenden Enden. Solche siRNAs (*short interfering* RNAs) entstehen, wenn ein Enzym namens Dicer (Häcksler) längere doppelsträngige RNA-Moleküle, die von sich selbst vermehrenden DNA-Sequenzen (a) oder Viren (b) stammen, in kurze Schnipsel einheitlicher Länge zerteilt. Regulatorische RNA-Sequenzen, die als microRNA-Vorläufer bekannt sind, werden von ihm auf die gleiche Art zerstückelt (c). Außerdem können Forscher mit Liposomen als Transportvehikeln künstliche siRNAs in die Zelle einschleusen (d).

All diese RNA-Schnipsel werden dann in die beiden Stränge aufgetrennt. Je einer davon verbindet sich schließlich mit Proteinen zum RNA-induzierten Silencing Complex (RISC). Dieser Komplex fängt Boten-RNAs mit komplementären Abschnitten ein. Passt der Abschnitt ziemlich perfekt zur Vorlage, wird das gefangene Boten-Molekül in der Mitte zerschnitten und damit unbrauchbar gemacht. Ausgedehntere Fehlpaarungen lösen eine andere Reaktion aus. Vermutlich blockiert RISC in diesem Fall die am Strang entlanggleitenden Ribosomen, sodass sie die Übersetzung der RNA in das zugehörige Protein nicht zu Ende bringen können.



In Zellen, die künstliche siRNAs mit der Sequenz des Lamin-Gens aufgenommen haben, ist das Leuchten erloschen: Sie produzieren kein Lamin mehr.

GRAFIK: TERESE WINSLOW; FOTOS: THOMAS TUSCHL, THE ROCKEFELLER UNIVERSITY

es sich wohl in einem gemeinsamen Vorläufer von Pflanzen, Tieren und Pilzen als Schutz gegen Viren und mobile genetische Elemente. Und diese Aufgabe erfüllt es offenbar immer noch. So haben die Gruppen von Ronald H. A. Plasterk am Niederländischen Krebs-Institut in Amsterdam und Hervé Vaucheret am Französischen Nationalinstitut für Landwirtschaftliche Forschung in Paris nachgewiesen, dass heutige Würmer mittels RNA-Interferenz mobile genetische Elemente in Schach halten und dass Pflanzen sie zur Abwehr von Viren einsetzen.

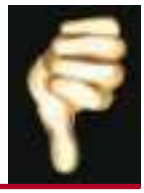
Doch scheint der Mechanismus auch bei vielen anderen biologischen Prozessen eine Rolle zu spielen. So zeigen mutierte Pflanzen und Tiere, die sehr wenig Dicer-Enzym oder nur eine defekte Form davon produzieren, vielfältige Entwicklungsstörungen und können sich nicht fortpflanzen. Was ist der Grund dafür?

Einer Hypothese zufolge borgte sich die Natur, nachdem sie ein so schlagkräftiges System zur Inaktivierung gefährlicher Gene aus Viren und mobilen genetischen Elementen entwickelt hatte, Instrumente aus der RNAi-Werkzeugkiste zunehmend auch für andere Zwecke aus. Jede Zelle eines Organismus besitzt die gleichen Gene. Was sie von Zellen in anderen Geweben unterscheidet, ist, welche davon sie exprimiert und welche nicht.

Die meisten Pflanzen und Tiere entwickeln sich aus einer einzelnen embryonalen Zelle, die sich wiederholt teilt und dabei schließlich viele unterschiedliche Zelltypen hervorbringt. Damit dies geschieht, müssen zahlreiche Gene, die im Embryo aktiv sind, im reifenden Organ abgeschaltet und dafür andere, die anfangs stumm waren, aktiviert werden. Außer bei der Abwehr gegen Fremdgene macht sich die RNAi-Maschinerie offenbar auch hier nützlich und hilft, bestimmten zelleigenen Genen einen Maulkorb zu verpassen, damit der Übergang in so unterschiedliche Zelltypen wie Nerven- und Muskelzellen oder in spezialisierte Organe wie Herz und Gehirn gelingt.

Doch was veranlasst das RNAi-System, plötzlich auch normalen Boten-RNAs den Mund zu verbieten? In manchen Fällen scheint die Zelle speziell für diesen Zweck lange doppelsträngige RNAs zu bilden. Häufiger jedoch dienen microRNAs als Auslöser: kleine Moleküle, die den siRNAs ähneln, aber anders entstehen. Während siRNAs denselben Genen oder Genregionen entstammen, deren Aktivität sie unterdrücken, werden microRNAs von Genen codiert, deren einziger Zweck eben die Produktion dieser kurzen regulatorischen Moleküle ist.

Mittels RNAi ließ sich die Vermehrung von Aids-, Polio- und Hepatitis-C-Viren in menschlichen Zellen vorübergehend stoppen

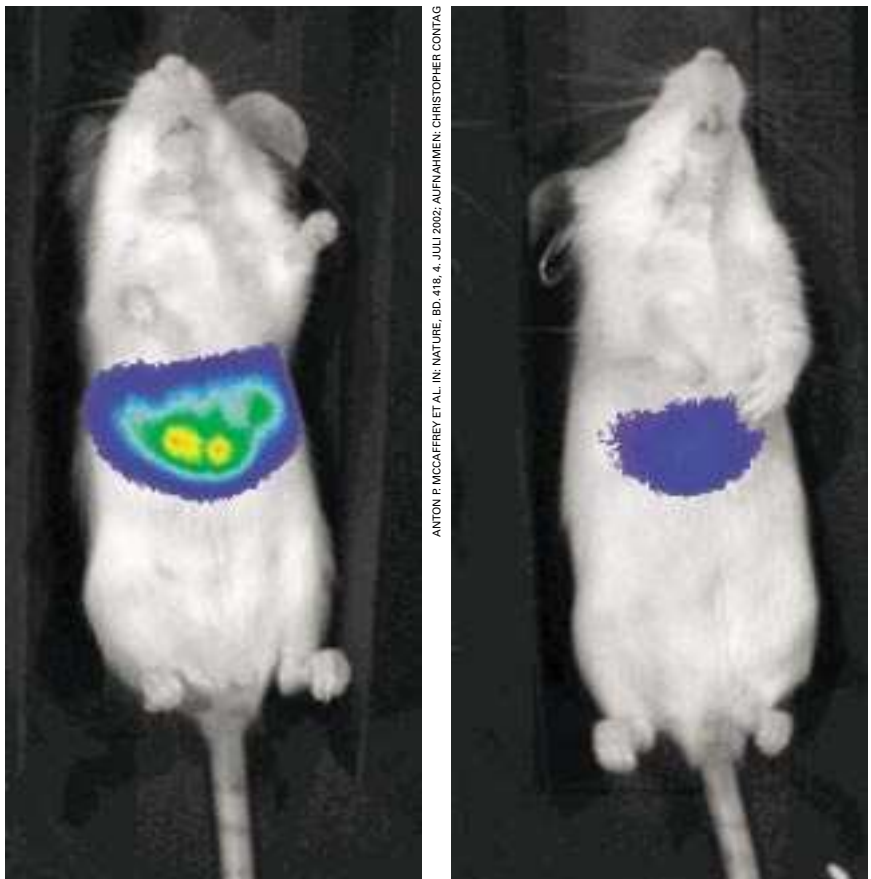


Die einzelsträngige RNA, die bei der Transkription, also der Abschrift solcher Gene zunächst entsteht, biegt sich in einer Schleife zurück und paart sich mit sich selbst. Das resultierende Gebilde hat gewisse Ähnlichkeit mit einer Haarnadel. Deren Mittelstück schneidet das Häcksler-Enzym dann heraus und erzeugt so ein Fragment, das sich wie eine siRNA verhält – mit dem entscheidenden Unterschied, dass es nicht das Gen zensiert, von dem es abstammt, sondern ein völlig anderes.

Wie bei der Entdeckung der RNA-Interferenz dauerte es auch bei den microRNAs einige Zeit, bis ihre Bedeutung für die Genregulation in vollem Umfang erkannt wurde. So waren lange nur zwei Vertreter namens *lin-4*- und *let-7*-RNA bekannt, die Victor Ambros und seine Mitarbeiter am Dartmouth College in Hanover (New Hampshire) und die Gruppe um Gary Ruvkun an der Harvard-Universität entdeckt hatten. In den letzten beiden Jahren konnten wir selbst, Tuschl, Ambros und andere Forscher dann einige hundert weitere microRNAs in Würmern, Fliegen, Pflanzen und auch beim Menschen aufspüren.

Hunderte übersehener Steuergene

Zusammen mit Chris Burge vom MIT haben wir abgeschätzt, dass menschliche Zellen über 200 bis 255 microRNA-Gene verfügen, was fast einem Prozent unseres Genpools entspricht. Sie waren vorher übersehen worden, weil man die Computerprogramme, die den Wust an Sequenzdaten nach Genen durchforsteten, nicht darauf geeicht hatte, diese be-



ANTON P. MCCAFFREY ET AL. IN: NATURE, BD. 418, 4. JULI 2002; AUFNAHMEN: CHRISTOPHER CONTAG

Mäuse mit künstlich eingeführtem Luciferase-Gen beginnen wie Glühwürmchen zu leuchten, wenn man ihnen Luciferin injiziert (links). Der Effekt ließ sich jedoch unterbinden, wenn man den Nagern zunächst passende siRNAs spritzte – ein Beweis, dass die RNA-Interferenz auch bei Säugetieren funktioniert.

Auf dem Weg zu medizinischen Anwendungen der RNA-Interferenz

Obwohl der Mechanismus der RNA-Interferenz in Säugerzellen erst vor zwei Jahren aufgedeckt wurde, suchen schon rund zehn Firmen nach Möglichkeiten, den Effekt zur Behandlung oder Prävention von Erkrankungen beim Menschen zu nutzen.

Firma	Projekte	Stand
Alnylam Pharmaceuticals Cambridge (Massachusetts)	Erforscht therapeutische Anwendungen der RNAi; spezifische Zielgene wurden noch nicht bekannt gegeben.	Im Jahre 2002 von Bartel, Tuschl, Sharp und Zamore gegründet und im Juli 2003 mit Ribopharma zur Alnylam Holding fusioniert. Die Firma hält mehrere Patente und konnte zu ihren knapp 20 Millionen US-Dollar Anschubfinanzierung im Zuge der Fusion 24,6 Millionen hinzugewinnen.
Ribopharma Kulmbach	Chemische Modifikation von siRNAs zur Herstellung von Medikamenten gegen Glioblastome, Pankreaskarzinome und Hepatitis C	Klinische Studien bei Patienten mit Glioblastomen (Hirntumoren) sollen dieses Jahr anlaufen. Die Firma wurde im Juli mit Alnylam fusioniert.
Cenix Biosciences Dresden	Erforscht die Möglichkeiten der RNAi zur Therapie von Krebs und viralen Infektionen.	Baut zusammen mit der Firma Ambion (Texas) eine siRNA-Bibliothek auf, die das ganze menschliche Genom abdecken soll.
Mirus Madison (Wisconsin)	Optimiert das Einbringen von siRNAs in Organe mittels konventioneller intravenöser Injektion.	Vorklinische Tests an Nagetieren
Sirna Therapeutics Denver (Colorado)	Klinische Prüfung eines Medikaments auf Basis einer katalytisch aktiven RNA bei Patienten mit fortgeschrittenem Dickdarmkrebs. Versuche, die RNAi für therapeutische Zwecke einzusetzen, sind noch im Frühstadium.	Hieß bis April Ribozyme Pharmaceuticals und hat vor kurzem 48 Millionen US-Dollar Risikokapital eingeworben.

sondere Art winziger Gene aufzuspüren, auf denen statt eines Proteins eine RNA als Endprodukt verschlüsselt ist.

Wie Zamore und James C. Carrington an der Staatsuniversität von Oregon nachwiesen, üben zumindest einige, vor allem pflanzliche, microRNAs in der bekannten Art ihre Aufgabe aus, indem sie komplementäre Boten-RNAs zerschneiden. Bonnie Bartel von der Rice-Universität in Houston (Texas) und wir konnten außerdem zeigen, dass diese Zensoren in Pflanzen vor allem Gene zum Schweigen bringen, die für Entwicklungsprozesse wichtig sind. Indem sie deren Botschaft während der Reifung unterdrücken, dürften sie mit dafür sorgen, dass sich die einzelnen Zellen jeweils in den korrekten Typ verwandeln und die richtigen Strukturen bilden.

Interessanterweise können die RNAs *lin-4* und *let-7*, die beim Fadenwurm ursprünglich wegen ihrer Funktion als Schrittmacher der Entwicklung vom Ei zum erwachsenen Tier entdeckt wurden, ihre Aufgabe aber noch auf eine zweite Art erfüllen. Sie schnappen sich auch Boten-RNAs, die nicht ganz komplementär zu ihnen sind. Diese zerschneiden sie dann aber nicht, sondern verhindern über irgendeinen anderen Mechanismus die Translation in korrekte Proteine.

Angesichts dieser diversen Silencing-Strategien steht zu vermuten, dass die siRNAs noch mehr zu bieten haben. So mehren sich die Hinweise, dass sie nicht nur Boten-RNAs abfangen und der Zerstörung zuführen, sondern ihr Zensurwerk auch an der DNA selbst verrichten. Im Extremfall schneiden sie einzelne Gene einfach heraus, wie das Team um Martin Grovosky von der Universität Rochester bei dem einzelligen Süßwasserbewohner *Tetrahymena thermophila* beobachtete. Meist aber werden beim Silencing auf DNA-Ebene die Gene nicht wirklich entfernt, sondern nur fester verschnürt, was ihre Transkription verhindert.

Von bescheidenen Anfängen, als weiß gefleckte Petunien und fehlgebildete Fadenwürmer die Neugier der Forscher weckten, hat sich das Studium der RNA-Interferenz in kürzester Zeit zu einem imposanten Unternehmen ausgewachsen. Fast alle Bereiche der modernen Biologie, Biomedizin und Biotechnologie sind von dem Phänomen betroffen. Mehr und mehr Labors ergründen es daher an immer anderen Modellorganismen.

Und das ist auch gut so; denn viele faszinierende Fragen sind noch offen. Wie weit reicht das Spektrum biologischer Vorgänge, bei denen die RNA-Interferenz eine Rolle spielt? Wie funktioniert die Zensur auf der Ebene chemischer Bindungen und Reaktionsmechanismen? Gibt es Krankheiten, die auf Defekten im RNAi-System oder bei den microRNAs beruhen? Mit jedem Schritt, den die Wissenschaft bei der Klärung dieser Fragen vorankommt, nimmt unsere Kenntnis dieses erstaunlichen Phänomens solidere Formen an – und verfestigt sich schließlich vielleicht zum Fundament für eine neue Säule der genetischen Medizin. ◁

Nelson C. Lau (oben) und **David P. Bartel** erforschen natürlich vorkommende kleine RNAs mit regulatorischer Funktion und erhielten 2002 den Newcomb-Cleveland-Preis der American Association for the Advancement of Sciences. Lau promoviert am Whitehead-Institut und am Massachusetts Institute of Technology (MIT), beide in Cambridge. Bartel kam nach seiner Promotion an der Harvard-Universität in Boston 1994 als Stipendiat ans Whitehead-Institut. Er ist zudem Associate Professor am MIT und Gründungsmitglied der Firma Alnylam Pharmaceutics, die Medikamente auf Basis der RNA-Interferenz entwickelt.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

RNA-Interferenz: Ein neues Werkzeug zur Analyse der Genfunktion. Von Christian Eggert und Utz Fischer in: Biospektrum 4/2003, S. 372.

Gene Silencing in Mammals by Short Interfering RNAs. Von Michael T. McManus und Philip A. Sharp in: Nature Reviews Genetics, Bd. 3, S. 737, Oktober 2002.

RNAi: Nature Abhors A Double-Strand. Von György Hutvánger und Philip D. Zamore in: Current Opinion in Genetics and Development, Bd. 12, S. 225, April 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

HEART BIOSYSTEMS

Stammzell-Therapie nach Herzinfarkt

Von Claudia Eberhard-Metzger

Wenn das Herz seinen Dienst versagt, weil Teile des Gewebes nicht mehr ausreichend mit Blut versorgt werden, bleiben den Ärzten nur wenige Stunden, um medikamentös die noch intakten Herzmuskelzellen zu erhalten und den Gefäßverschluss aufzulösen (Spektrum der Wissenschaft 1/2003, S. 71). Das Herz aber bleibt geschwächt. Könnte man nicht die abgestorbenen Zellen im Infarktkern durch neue ersetzen?

Unter dem Mikroskop funktioniert das schon perfekt: Rhythmisch zucken lang gestreckte Zellen im Takt. »Es fasziniert immer wieder«, freut sich Jan-Heiner Küpper, Geschäftsführer und Mitgründer des Unternehmens Heart BioSystems in Heidelberg: »Eine Zelle beginnt, und bald kontrahiert sich der ganze Verband synchron, so wie es sich für Zellen des Herzmuskels gehört.« Das kleine Wunder haben die Wissenschaftler aus adulten Stammzellen des Knochenmarks herangezüchtet (siehe Kasten). Bald wollen sie solche Zellen im Auftrag von Kliniken zur Therapie von schweren Herzschäden produzieren. Bereits im nächsten Jahr sollen die klinischen Studien beginnen.

Die Teilungsuhr zurückstellen

So weit die Unternehmensvision des 2001 gegründeten Start-ups. Im selben Jahr hatten Mediziner der Universitätsklinik Düsseldorf einem Infarktopfer erstmals adulte Stammzellen ins Herz injiziert, und sie berichteten von einer sich daraufhin deutlich bessernden Herzleistung. Dass dieser Erfolg allerdings tatsächlich auf der Regenerationskraft der übertragenen Zellen und nicht auf der üblichen Behandlung beruhte, blieb letztlich unbewiesen und wurde von Experten bezweifelt. Die Molekularbiologen von Heart BioSystems entwickeln deshalb Kriterien und Testverfahren, um vor einer Transplantation der potenziell heilsamen Zellen deren Quantität und Qualität zu prüfen.

Besonderes Know-how des Unternehmens steckt in einem patentgeschützten Substanzgemisch, das den adulten Stammzellen aus dem Knochenmark des Patienten zugegeben wird, um ihre Teilungsbereitschaft zu erhalten und sie im Kulturgefäß zu vermehren. »Vereinfacht gesagt, stellen wir die Teilungsuhr, die den Zellen von Natur aus eingebaut ist, wieder ein Stück zurück«, erklärt Küpper. So weit, dass die gewonnene Zeit ausreicht, um zunächst genügend Stammzellen zu züchten, die sich anschließend durch Zugabe entsprechender Wachstumsfaktoren zu transplantationsfähigen Herzmuskelzellen weiterentwickeln. Die

Stichwort: Stammzellen

Eine für alles

Als Pluripotenz bezeichnen Wissenschaftler die Fähigkeit von Stammzellen, sich zu allen Zelltypen des Körpers zu entwickeln – zu »differenzieren« – und dann als Muskel-, Nerven- oder Blutzellen ihren hoch spezialisierten Dienst zu tun. Da wundert es nicht, dass Forscher große Hoffnungen auf die Multitalente setzen, um mit ihnen diverse Krankheiten zu heilen (Spektrum der Wissenschaft 5/2003, S. 66).

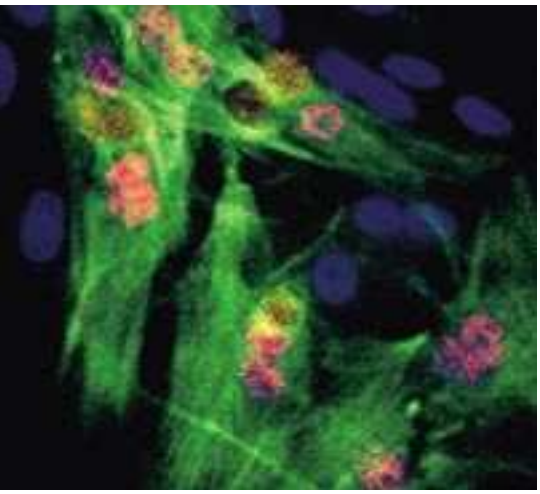
Wie alles Wertvolle sind Stammzellen rar. Es gibt sie in Embryonen, Feten und in rund zwanzig Organen des menschlichen Körpers, zum Beispiel im Knochenmark. Dementsprechend unterscheiden Wissenschaftler embryonale, fetale und adulte Stammzellen.

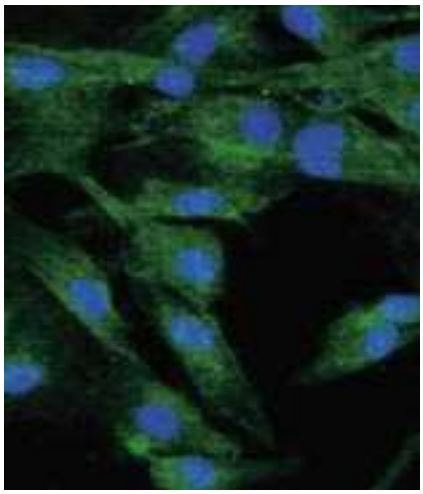
Die Differenzierung von Stamm- zu Herzmuskelzellen erfordert allerlei Tricks, etwa die Erhaltung ihrer Teilungsbereitschaft.

Erstere werden wenige Tage alten Embryonen entnommen, die bei künstlicher Befruchtung entstanden. Alle Zellen, die aus einer solchen Eizelle hervorgehen, sind bis zum »Acht-Zell-Stadium« totipotent, können also noch einen vollständigen Organismus erzeugen. Aus diesem Zellverband entwickelt sich eine winzige Hohlkugel, die Blastozyste, aus deren innerer Zellmasse am vierten Entwicklungstag »nur noch« pluripotente embryonale Stammzellen für die Forschung isoliert werden könnten (aus ihnen ginge kein vollständiger Organismus mehr hervor). Diese Methode zur Gewinnung von Stammzellen verbietet das deutsche Embryonenschutzgesetz. Unter bestimmten Voraussetzungen ist es den Wissenschaftlern lediglich erlaubt, embryonale Stammzellen aus abgetriebenen Feten zu erschließen.

Ethische und rechtliche Probleme gibt es beim Gewinnen adulter Stammzellen nicht. Sie bilden im erwachsenen Organismus gleichsam ein Reservoir, das verfügbar ist, um die unterschiedlichsten Arten von Ersatzzellen zu bilden. Im Gegensatz zu den embryonalen Stammzellen haben sie jedoch ein geringeres Entwicklungspotenzial; auch ihre Teilungsfähigkeit ist begrenzt. Ihr Vorteil ist, dass sie dem Patienten selbst entnommen werden können und als körpereigene Zellen nach erfolgreicher Züchtung und Transplantation vom Immunsystem akzeptiert und nicht abgestoßen werden.

Ob adulte Stammzellen tatsächlich halten, was man sich von ihnen verspricht, muss sich noch herausstellen. In den Chor der Optimisten mischen sich immer wieder auch kritische Stimmen, welche die universale Verwandlungskunst bezweifeln.





ALLE ABBILDUNGEN: HEART BIOSYSTEMS

Original und Fälschung: Das linke Mikroskopbild zeigt »echte« Herzmuskelzellen, das rechte aus Stammzellen gewonnene. Durch Markierung mit einem Farbstoff erscheinen Zellkerne blau.

komplette Aufbereitung von der Entnahme der Stammzellen aus dem Knochenmark des Patienten über die Vermehrung bis hin zur Spezialisierung zu Herzmuskelzellen im Labor dauert wahrscheinlich zwei bis drei Wochen. Eine Abschätzung der Kosten ist noch nicht möglich.

Die Vision geht aber noch weiter: Möglicherweise eignet sich das patentierte Substanzgemisch auch, um die Zellen »in vivo«, also im lebenden Organismus, zur kontrollierten Teilung anzuregen. Einem lebensgefährlich geschwächten Herzmuskel, etwa bei Herzinsuffizienz, könnte auf diese Weise seine ursprüngliche Schlagkraft zurückgegeben werden.

Wir machen den Stent frei

Die Wissenschaftler von Heart BioSystems entwickeln als weiteres Standbein ihres Unternehmens zudem Medikamente, die die Teilung bestimmter Zellen gezielt abschalten. Ein Kardinalproblem bei der Behandlung von Herz- und Gefäßleiden ist nämlich der Wiederverschluss, die »Restenose«, eines Gefäßes nach einer Aufweitung (Dilatation). Haben arteriosklerotische Ablagerungen dessen Wand derart verdickt (»verkalkt«), dass der Blutfluss behindert oder gar blockiert wird, führt der Arzt einen Ballonkatheter ein und bläst ihn an der verengten Stelle auf. Doch der Erfolg ist oft nur von kurzer Dauer, bei jedem zweiten Patienten verschließt sich das Gefäß erneut. Dies soll ein Stent verhindern, ein röhrenförmiges, elastisches Drahtgeflecht, das implantiert wird, um das geweitete Gefäß offen zu halten. Doch auch das reduziert die Restenose-Quote nur von fünfzig auf dreißig Prozent. Denn ein Stent kann zwar das Kollabieren einer Arterienwand verhindern, nicht aber das unkontrollierte Wachstum glatter Muskelzellen der Gefäßwand, das als Folge der Aufweitung einsetzt und zum Verschluss führen kann.

Heart BioSystems will dagegen so genannte Anti-Sense-Moleküle einsetzen. Die dringen in das Innere der Gefäßmuskelzelle ein und verhindern, dass bestimmte Proteine erzeugt werden, die für die Teilung der kritischen Zellen erforderlich sind. Bereits vorhandene Gefäßverengungen wollen die Wissenschaftler überdies mit gentechnisch hergestellten Proteinen sozusagen einschmelzen, welche die sich übermäßig teilenden Gefäßmuskelzellen in den programmierten Zelltod, in die »Apoptose«, treiben. »Zurzeit entwickeln wir geeignete Systeme, um diese Proteine zelltypspezifisch zu übertragen.«

Solche Vorhaben umzusetzen kostet freilich sehr viel Zeit und Geld. Unterstützt wird das junge Heidelberger Biotechunternehmen von verschiedenen Investoren und mit Fördermitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie. Jan-Heiner Küpper und die Heart-BioSystems-Mitbegründer, die Molekularbiologin Anne Kuhn und der Wirtschaftswissenschaftler Stefan Holder, sind zuversichtlich: »Wir verfügen über sieben Patente, ein achtes haben wir gerade angemeldet, andere Start-ups haben gerade mal eines.« ◁

Claudia Eberhard-Metzger ist Wissenschaftsjournalistin mit Schwerpunkt Biowissenschaften in Maikammer.

WICHTIGE ONLINE-ADRESSEN

›› Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion,
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

›› DOK –
Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

›› Forschungszentrum Jülich
Brennstoffzellen
Technologie, Jobs,
Dissertationen, Diplomarbeiten
www.fuelcells.de/jobs

›› Forum MedizinTechnik
und Pharma in Bayern e. V.
Innovationen für die Medizin
www.forum-medtech-pharma.de

›› Kernmechanik –
die neue Quantenphysik
alle Kerne, alle Kräfte und Kosmologie
www.kernmechanik.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 80,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon (02 11) 887-23 94
E-Mail: m.grigo@vhb.de

Alkohol fürs Herz

Das tägliche Glas Wein scheint vor Herzinfarkt zu schützen. Bevor man es sich verordnet, sollte man aber die Risiken abwägen.

Von Arthur L. Klatsky

Als junger Politiker hielt Abraham Lincoln (1809–1865), späterer Präsident der Vereinigten Staaten von Amerika, vor einem Abstinenzler-Verband eine Rede. Er mahnte seine pikierten Zuhörer: Gewiss hätten Alkoholika viele Menschen zu Grunde gerichtet. Dennoch dürfe man die »berauschenden Getränke« nicht von Grund auf verdammen. Schuld sei nicht, dass die Leute »etwas Böses« verwendeten, sondern dass sie »etwas sehr Gutes« missbrauchten.

Das gilt bis heute. Keinesfalls darf man herunterspielen, welch hohen Tribut die Betroffenen, ihre Mitmenschen und die Gesellschaft dem Alkoholmissbrauch zollen. Es wäre aber falsch, nur die Gefahren des Alkoholkonsums zu werten und den möglichen medizinischen Nutzen nicht sehen zu wollen. Eine wachsende Zahl wissenschaftlicher Studien zeigt solche Vorteile auf. Demnach vermag ein moderater Genuss alkoholischer Getränke vor Arteriosklerose und ihren Folgen – wie Herzinfarkt und (ischämischem) Schlaganfall durch Gefäßverschluss – zu schützen. Es gibt auch Hinweise, dass Alkohol einer Demenz vorbeugen hilft, die auf Durchblutungsstörungen beruht.

Was aber heißt »moderater Genuss«? An sich ist die Abgrenzung zum »geringen« beziehungsweise »starken« Alkoholkonsum eher willkürlich. In der medizinischen Literatur wird heute unter moderatem, also mäßigem Genuss meist verstanden, dass Männer am Tag höchstens zwei so genannte Standarddrinks zu sich nehmen. Nach einer internationalen Konvention wären das zwanzig Gramm Alkohol, etwas weniger als zwei kleine Bier oder zwei Gläser Wein. Für Frauen gilt aus physiologischen Gründen die Hälfte. (In diesem Text sind mit einem Drink der Vereinfachung halber ein kleines Bier oder ein Glas Wein gemeint.) Dass ein Mehr gesundheitsschädlich sein kann, haben Studien belegt. Aber selbst weniger kann bereits schlecht sein. Wie viel der Körper verkraftet, wo also die individuelle Grenze liegt, hängt von vielen Faktoren ab, insbesondere auch von Geschlecht und Alter sowie von den gesundheitlichen Voraussetzungen. Jugendliche, Schwangere, Leberkranke und ehemalige Alkoholiker sollten auf das Genussmittel völlig verzichten. Große Vorsicht ist auch Personen anzuraten, in deren Familie Alkoholmissbrauch vorkommt.

Der wichtigste medizinische Nutzen von mäßigem Alkoholtrinken scheint zu sein, dass das Risiko einer koronaren Herzkrankheit (KHK) sinkt. Wenn sich in der Innenwand der Herzkranzgefäße mit der Zeit arteriosklerotische Herde – Plaques – bilden, kann das zur Folge haben, dass der Herzmuskel nicht mehr ausreichend mit Blut und Sauerstoff versorgt wird. Diese Stellen sind entzündlich und können auch leicht aufbrechen. Wenn sich dann Blutgerinnsel bilden, verengen oder verstopfen sie die Gefäße. Die Folge: Angina pectoris – »Brustenge« wegen Sauerstoffmangels des Herzmuskels – bis hin zum Herzinfarkt, bei dem Herzmuskelgewebe infolge eines Verschlusses der versorgenden Arterien zu Grunde geht (siehe »Arteriosklerose als

ALLE FOTOS: TINA WEST

Entzündung«, Spektrum der Wissenschaft 7/2002, S. 48).

Die Plaques entstehen in den Herzkranzgefäßen schleichend, mit ersten Ansätzen meist schon in jungem Alter. Gewöhnlich dauert es Jahrzehnte, bis sich das Vollbild einer Koronarerkrankung ausbildet, das häufigste Herzleiden in den Industrienationen. Hier geht jeder vierte Todesfall darauf zurück. Das sind sechzig Prozent aller Todesfälle durch Herzkreislauferkrankungen.

Erste Hinweise auf diesbezüglich günstige Wirkungen von Alkohol fanden Pathologen schon Anfang des 20. Jahrhunderts. Die Blutgefäße von Alkoholkranken, die an einer Leberzirrhose gestorben waren, wiesen auffallend saubere Innenwände auf. Konnte Alkohol etwa Gefäßablagerungen auflösen? Oder waren diese Personen einfach so jung verstorben, dass sich Arteriosklerose bei ihnen noch nicht zeigte?

Enthaltsamkeit: der neue Risikofaktor

Weitere Erkenntnisse hierzu ließen lange auf sich warten. Ende der 1960er Jahre machte Gary D. Friedman von der größten nicht-kommerziellen Gesundheitseinrichtung der USA, dem Kaiser Permanente Medical Center in Oakland (Kalifornien), erstmals eine umfangreiche computergestützte statistische Analyse. Er suchte nach bis dato unbekannten Prädiktoren für den Herzinfarkt. Im ersten Schritt ermittelte der Computer gesunde Personen, die in vieler Hinsicht die gleichen Risikofaktoren aufwiesen wie Herzinfarkt-Patienten. Was war nun bei den Gesunden anders?

In jenen Jahren war der Herzinfarkt immer häufiger aufgetreten. Zu den bis dahin bekannten oder vermuteten Risiken zählten insbesondere Rauchen, Bluthochdruck und Diabetes. Bedenklich waren ferner erhöhte Blutwerte des »schlechten« LDL-Cholesterins sowie niedrige Werte des »guten« HDL-Cholesterins (für englisch *light density lipoprotein*, ein Lipoprotein geringer Dichte, und *high density lipoprotein*, ein Lipoprotein hoher Dichte). Auch schienen Männer insgesamt stärker gefährdet als Frauen. Das ▷

Umfangreiche Statistiken belegen: Ein Drink pro Tag kann für Herz und Gefäße gesund sein.

Mögliche Schutzwirkungen von Alkohol

Wirkung	vermuteter Mechanismus	wissenschaftliche Hinweise
erhöht HDL-Cholesterin im Blut	fördert Abtransport von LDL-Cholesterin aus den Gefäßwänden	gut belegt; erklärt mindestens 50 Prozent der Schutzwirkung
senkt LDL-Cholesterin im Blut	vermindert einen großen KHK-Risikofaktor	schwach belegt; Wirkung vermutlich auch ernährungsabhängig
vermindert Oxidation von LDL-Cholesterin	verhindert mit LDL-Oxidation einhergehende Plaquebildung	weitgehend hypothetisch; Rotwein enthält allerdings reichlich Antioxidantien
senkt Fibrinogenspiegel im Blut	vermindert Gefahr der Gerinnselbildung an arteriosklerotischen Plaques	mäßig gut belegt
weitere Einflüsse auf die Blutgerinnung: senkt Neigung der Blutplättchen zu verklumpen; erhöht Prostacyclin-Werte; senkt Thromboxan-Werte	vermindert Gefahr der Gerinnselbildung an arteriosklerotischen Plaques	Daten widersprüchlich; bei starkem Konsum oder gelegentlichem Missbrauch möglicherweise gegenteilige Wirkung
senkt Insulinresistenz (Insulinunempfindlichkeit)	senkt einen Schlüsselrisikofaktor für Typ-II-Diabetes und Arteriosklerose	wenige Studien
senkt psychischen Stress	unklar	keine Studien
verbessert Zustand des Herzmuskels	besserer Widerstand gegen Sauerstoffmangel	vorläufige Hinweise

▷ Risiko wuchs, wenn in der Familiengeschichte eine Koronarerkrankung vorkam. Friedman verglich die Infarktpatienten mit der gesund gebliebenen Risikogruppe in mannigfaltigen Faktoren, darunter sportliche Betätigung, Ernährungsgewohnheiten oder verschiedene Blutwerte. Dabei stieß er auf einen erstaunlichen Zusammenhang: Alkoholabstinenz ging mit einem erhöhten Herzinfarktrisiko einher.

Statistik für Nichtraucher

Frühere Studien hatten diesen Zusammenhang nicht aufdecken können, weil der Einfluss von Alkohol und von Tabak nicht getrennt untersucht wurde. Viele Alkoholliebhaber rauchen auch, was eine Arteriosklerose stark fördert und den günstigen Effekt des Alkohols überdeckt. Die erste Publikation, die das Nichtrauchen und seine Effekte analysierte, war unseres Wissens die Arbeit von meinen Kollegen Friedman, Abraham B. Siegelaub und mir aus dem Jahr 1974. Darin zeigte sich klar, dass die Herzinfarktgefahr für Nichtraucher geringer ist, wenn sie sich regelmäßig ein Gläschen gönnen, als wenn sie Alkohol meiden.

Dieser Erhebung sind seitdem Dutzende mit ähnlichem Ergebnis gefolgt. Erfasst wurden in einer Reihe von Ländern die Folgen bestimmter Alkoholmengen auf Männer und Frauen und auf Angehörige verschiedener Rassen. Dabei korrelierten die Forscher den derzeitigen Gesundheitszustand mit den zurückliegenden Trinkgewohnheiten. Auch diese Studien erhärteten den Verdacht, dass völlige Abstinenzler häufiger Koronarerkrankungen entwickeln und auch öfter daran sterben als Personen, die in geringem Maße Alkoholika trinken. Ein Forscherteam um Giovanni Corrao von der Universität Mailand-Bicocca und Kari Poikolainen vom Suchtklinikum in Järvenpää (Finnland) untersuchte vor einigen Jahren die Ergebnisse aus 28 solcher Statistiken in einer Metaanalyse. Heraus kam, dass bei täglich bis zu zwei Drinks (bei Männern) – oder 25 Gramm Alkohol – das Risiko für Herzattacken und plötzlichen Herztod infolge einer Koronarerkrankung sinkt. Innerhalb dieser Spanne ging es mit der Menge zurück. Wer täglich 25 Gramm konsumierte, dessen Risiko für Herzinfarkt oder plötzlichen Herztod war um zwanzig Prozent geringer als das abstinenter Personen.

Aktualisierte Analysen, die meine Kollegen Friedman, Mary Anne Armstrong, Harald Kipp und ich kürzlich auf einer Konferenz vorstellten, liefern noch eindrucksvollere Zahlen. Sie stützen sich auf die Daten von 128 934 Personen, die sich zwischen 1978 und 1985 einem Gesundheitscheck unterzogen hatten und von denen bisher 16 539 gestorben waren, davon 3001 an den Folgen einer Koronarerkrankung. Bei ein oder zwei Drinks am Tag lag das Risiko eines tödlichen Herzinfarkts infolge Arteriosklerose sogar um 32 Prozent niedriger als bei Alkoholabstinenz.

Der Cholesterin-Effekt

Wie erklärt sich die Schutzwirkung? Anscheinend tragen mehrere Einflüsse in unterschiedlichem Maße dazu bei. Besonders gewichtig dürfte die Auswirkung des Alkohols auf den Cholesterinspiegel sein. Alkoholliebhaber haben um zehn bis zwanzig Prozent höhere Werte für das herzschützende HDL-Cholesterin. Drei unabhängigen Untersuchungen zufolge könnte dies etwa zur Hälfte zum verringerten Risiko für eine koronare Herzkrankheit beitragen. Sportliche Betätigung, die bekanntlich Arteriosklerose entgegenwirkt, erhöht das gute Cholesterin ebenfalls, allerdings den Untertyp HDL_2, während durch Alkohol HDL_3 steigt. Auch manche Medikamente gegen Arteriosklerose erhöhen den Anteil des guten Cholesterins. Es sorgt unter anderem dafür, dass das schlechte, das LDL-Cholesterin aus dem Blut zurück in die Leber gelangt, wo es um- oder abgebaut wird. Somit reichert sich weniger LDL in den Gefäßwänden an und es entstehen weniger arteriosklerotische Plaques. Wie Alkohol bewirkt, dass die Leber mehr HDL liefert, ist noch ungenügend erforscht. Denkbar wäre, dass er Leberenzyme anregt, die bei der Herstellung dieser Cholesterin-Fraktion mitwirken.

Des Weiteren scheint Alkohol die Blutgerinnung günstig zu beeinflussen. Womöglich bewirkt er, dass die Blutplättchen weniger leicht zum Verklumpen neigen, sodass die Thrombusgefahr für die Herzkranzgefäße sinkt. Noch sind die Befunde hierzu allerdings widersprüchlich. Nachweislich erhöht Alkohol den Spiegel des gerinnungshemmenden Prostacyclin relativ zum gerinnungsfördernden Thromboxan. Zugleich steigert er den Gehalt an einem Gerinnsel auflösenden Enzym namens Plasminogenaktivator. Wie es aussieht, scheint Alkohol außerdem den Blutspiegel von Fibrinogen – einem gerinnungsfördernden Protein – zu senken.

Die Wirkungen auf die Blutgerinnung sind bislang weniger gut belegt als der Effekt auf das Cholesterin. Und bei starkem Alkoholkonsum sowie bei gelegentlichem Betrinken dürften sich manche der Folgen, etwa die verminderte Verklumpungsneigung der Blutplättchen, ins Gegenteil verkehren. Dennoch bleibt, dass die verminderte Herzinfarktgefahr bei moderatem Konsum offenbar auch auf den günstigen Einfluss auf die Blutgerinnung zurückgeht. Vor allem könnte dieser Effekt erklären, wieso schon der eher sporadische Genuss von Alkoholika, in der Größenordnung von drei oder vier Drinks pro Woche, das Risiko der Koronarerkrankungen deutlich zu senken vermag. Denn diese Mengen scheinen die Cholesterinwerte noch nicht stark zu verändern.

Ein geringer bis moderater Alkoholkonsum könnte auf noch subtilere Weise das Risiko beeinflussen. So wirkt Alkohol womöglich auch den Entzündungen in den Blutgefäßwänden entgegen, die zur koronaren Herzkrankheit beitragen, weil sich dadurch gefährliche, instabile Plaques bilden können. In letzter Zeit verdichten sich die Hinweise auf die Bedeutung solcher Entzündungen bei Arteriosklerose.

IN KÜRZE

- Studien in der ganzen Welt zufolge sinkt das Risiko, an den Folgen einer **koronaren Herzkrankheit** zu sterben, bei leichtem bis **mäßigem Alkoholkonsum** fast um ein Drittel.
- Einzelne Untersuchungen deuten darauf hin, dass besonders **Rotwein** das Herz schützt. Rotweintrinker könnten aber Lebensgewohnheiten haben, die zu diesem Effekt beitragen.
- Wer ein **hohes Risiko für eine koronare Herzkrankheit** trägt oder schon daran leidet und gleichzeitig nicht mit Alkoholproblemen oder anderen Folgekrankheiten rechnen muss, könnte mit seinem Arzt besprechen, ob ein moderater Alkoholkonsum für das Herz günstig wäre.

Alkohol und Diabetesrisiken

Auch für manche Diabetiker kann ein Drink ab und zu günstig sein (siehe Tabelle S. 67). Sie sollten allerdings dessen beträchtlichen Einfluss auf die Blutzucker- und Insulinwerte berücksichtigen. Diabetes geht häufig mit Gefäßschäden einher und birgt darum auch ein hohes Risiko, dass sich eine koronare Herzkrankheit ausbildet. Mäßiger Alkoholkonsum vermindert offenbar bereits die Gefahr, an Alters- oder Typ-II-Diabetes zu erkranken. Bei dieser Form der Zuckerkrankheit werden die Zellen unempfindlich gegen Insulin, das ihnen dabei hilft, Zucker aus dem Blut aufzunehmen. (Beim so genannten jugendlichen oder Typ-I-Diabetes gehen dagegen die Insulin produzierenden Zellen der Bauchspeicheldrüse zu Grunde.) Wahrscheinlich steigert der Alkohol die Insulinempfindlichkeit der Zellen. Allerdings gilt das nicht bei Alkoholmissbrauch. Er bewirkt offenbar sogar einen erhöhten Blutzuckerspiegel, womit sich ein drohender Altersdiabetes anzukündigen pflegt.

Bei Befunden wie den hier beschriebenen wird ein Epidemiologe immer zuerst prüfen, ob der Effekt nicht in Wirklichkeit eine völlig andere, versteckte Ursache hat. Alkoholtrinker und Abstinente könnten sich in irgendeiner noch nicht berücksichtigten Hinsicht unterscheiden, die vom Trinkverhalten unabhängig, aber für das Koronarrisiko relevant ist. Dabei mag es sich um eine psychische Eigenheit handeln, um irgendwelche spezifischen Gewohnheiten etwa hinsichtlich Ernährung oder körperlicher Betätigung, oder um etwas ganz anderes. Wäre dies mit den Trinkgewohnheiten gekoppelt, würden die Statistiken fälschlich so aussehen, als sei die Alkoholmenge der entscheidende Einfluss. Gäbe es solche verdeckten Faktoren, müssten sie aber bei beiden Geschlechtern, in verschiedenen Ländern und bei unterschiedlichen rassischen Gruppen vorhanden sein. Bisher ließ sich nichts dergleichen finden. Darum bleibt als einfachste und bisher plausibelste Hypothese, dass leichter bis mäßiger Alkoholgenuss tatsächlich die Gesundheit von Herz und Blutgefäßen unterstützt.

Die Belege hierfür genügen sogar weitgehend den Kriterien, die in epidemiologischen Studien standardmäßig verlangt werden, um einen Kausalzusammenhang zu begründen. Zum Beispiel kamen die verschiedenen Erhebungen, die nach der gesundheitlichen Wirkung leichten bis mäßigen Alkoholkonsums fragten, alle zu einem ähnlichen Schluss. Auch waren die Langzeitstudien im zeitlichen Ablauf korrekt konzipiert: Zu Anfang erfasste man die Gewohnheiten der Teilnehmer und verfolgte danach deren ▷

Segen und Gefahren – die zwei Seiten des Alkohols

leichter bis mäßiger Konsum		starker Konsum	
Gefahren	**Nutzen**	**Gefahren**	**Nutzen**
erwiesen: Missbrauch Verdacht: Brustkrebs Schädigung von Ungeborenen unwahrscheinlich: Darmkrebs Schlaganfall durch Hirnblutung hoher Blutdruck	wahrscheinlich: geringeres Risiko für koronare Herzkrankheit geringeres Risiko für ischämischen Schlaganfall geringeres Risiko für Gallensteine möglich: geringeres Risiko für Diabetes geringeres Risiko für Gefäßverengung oder Gefäßverschluss in Armen und Beinen	hoher Blutdruck Herzrhythmusstörungen hämorrhagischer Schlaganfall Herzmuskelschwäche Leberzirrhose Bauchspeicheldrüsenentzündung verschiedene Krebsarten Unfall Verbrechen Selbstmord Schädigung der Leibesfrucht zentralnervöse degenerative Erkrankungen	keinerlei

▷ Gesundheitszustand über Jahre. Dabei zeigten sich zwischen Alkoholkonsumenten und Abstinenzlern klare Unterschiede im Gesundheitsprofil. Als weiterer Punkt kommt hinzu, dass sich die günstigen Wirkungen des Alkohols durch biologische Mechanismen plausibel erklären lassen. Für unsere These spricht außerdem, dass Alkohol nicht generell vor Krankheit schützt, sondern nur spezifisch die Blutgefäße. Und es fanden sich noch keine anderweitigen Faktoren, welche die Befunde erklären können.

Nur maßvoller Genuss kann schützen

Manche mag es überraschen, aber die Aussage, Alkohol senke das Risiko für eine koronare Herzkrankheit um dreißig Prozent, besitzt weniger Kraft als die eben genannten Argumente. Wir können nicht völlig ausschließen, dass doch ein starker unbekannter Störfaktor existiert, der dieses Risiko sehr deutlich herabsetzt, aber zugleich so eng mit dem – schädlichen – Trinkverhalten verbunden ist, dass dies einen falschen Zusammenhang vorgaukelt. Um ein Extrembeispiel zu konstruieren: Man stelle sich eine Genkombination vor, die ihrem Träger ein um sechzig Prozent vermindertes Risiko für eine koronare Herzkrankheit beschert und ihm gleichzeitig eine starke Neigung verleiht, dem Alkohol maßvoll, aber regelmäßig zuzusprechen. Dieser Konsum würde die günstige Disposition um die Hälfte schwächen. Ein Einfluss dieser Art ist aber weder bekannt noch wahrscheinlich.

Ein Schwachpunkt der hier besprochenen These ist, dass die Erhebungen keine klare Dosis-Wirkungs-Beziehung ergeben, nach dem Motto: mehr hilft mehr. Starkes Trinken ist für das Herz nicht besser als mäßiger Konsum. Trotzdem sprechen die Daten sehr deutlich für die herzschützende Wirkung kontrollierten Alkoholgenusses. Allerdings fehlt bislang der beste Prüfstein: eine so genannte klinische randomisierte Blindstudie mit einer großen Teilnehmerzahl. Idealerweise hätten diese Personen bisher abstinent gelebt. Die Hälfte von ihnen »zöge das Los«, von nun an täglich ein bis zwei Drinks zu konsumieren, die andere bliebe enthaltsam. Die Mediziner, die ihren Gesundheitszustand über Jahre beobachteten, wüssten nicht, wer in welche Gruppe gehört.

Wie sollen sich Ärzte angesichts der bisherigen statistischen Befunde verhalten? Welchen Patienten sollen sie ein tägliches Glas Wein oder Bier empfehlen? Wer darf das Genussmittel in geringen, wer in moderaten Mengen zu sich nehmen? Gewöhnlich trinken die Menschen Alkoholika nicht, um einem Herzinfarkt vorzubeugen. Trotzdem konsumieren viele von allein so geringe Mengen, dass ein gefäßschützender Effekt zu erwarten ist. Andere sind freilich weniger vernünftig. Aber selbst mäßiger Konsum ist nicht jedem anzuraten, auch wenn der wohl nicht dieselben gesundheitlichen Gefahren birgt wie Alkoholmissbrauch.

Starkes Trinken – und das beginnt für Männer bereits bei mehr als zwei Drinks täglich – ist auf jeden Fall bedenklich, sowohl in medizinischer wie in sozialer Hinsicht. Abgesehen vom Suchtrisiko kann es zahlreiche Krankheiten nach sich ziehen, neben Leberzirrhose und Bauchspeicheldrüsenentzündung beispielsweise eine Reihe von Krebsarten und degenerative neurologische Störungen. Auch bei unzähligen Unfällen, Verbrechen und Selbstmorden ist Alkohol im Spiel. Unbedingt erwähnt werden müssen außerdem die durch Alkohol in der Schwangerschaft hervorgerufenen Behinderungen von Kindern (siehe auch »Alkohol – Das unterschätzte Gift«, Spektrum der Wissenschaft 4/2001, S. 58) .

Viel Alkohol ist auch für Herz und Gefäße sehr schädlich. Dem starken Trinker drohen Herzmuskelschwäche, Bluthochdruck und Schlaganfälle durch platzende Blutgefäße. Hoher Blutdruck ist selbst wieder ein Risikofaktor für Koronarerkrankungen, Schlaganfall, Herz- und Nierenversagen. Schon ein gelegentliches Besäufnis kann das Herz völlig aus dem Takt bringen. Amerikanische Ärzte sprechen von einem Urlaubs-Herz-Syndrom, denn sie diagnostizieren Herzrasen durch Vorhofflimmern gehäuft in Ferienzeiten und nach Feiertagen.

Unerwarteter Alkoholismus

Nicht zu unterschätzen ist auch die Gefahr, alkoholabhängig zu werden. Sogar mäßiger Konsum kann zum Problemtrinken ausarten. Ließe sich dieses oft unterschätzte Risiko für den Einzelnen sicher vorhersagen, wäre das eine große Entscheidungshilfe. Auch wenn in der Familie keine Alkoholiker oder alkoholbedingten Organerkrankungen, etwa Leberschäden, vorkommen, können Menschen nach Schicksalsschlägen oder in schwierigen Lebenssituationen alkoholkrank werden.

Wegen dieser Risiken und Auswirkungen ging es den Gesundheitsorganen bisher fast allein darum, den Alkoholmissbrauch und seine Folgen zu unterbinden. Ihre Plädoyers für völlige Abstinenz rühren daher, dass das Maß alkohol-

Maße für einen Standarddrink

Eine internationale Übereinkunft legte 1998 fest, dass ein Standarddrink rund zehn Gramm Alkohol enthält. Als grober Richtwert gelten vielfach auch zwölf Gramm, etwa die Menge in einem kleinen Bier oder einem kleinen Glas Wein. Auch ein Glas Whiskey entspricht etwa einem Standarddrink.

Wie viel Alkohol ist für das Herz gesund? Eine Entscheidungshilfe

Dieses Schema, das ich zusammen mit Roger R. Ecker vom Summit Medical Center in Oakland (Kalifornien) erstellt habe, ist als Orientierung für den Arzt gedacht. Es kann dabei helfen abzuwägen, ob und wie viel Alkohol einem Patienten anzuraten ist.

Das Schema gilt nicht für:

- Personen unter 21 Jahre
- Schwangere
- Alkoholkranke, auch »trockene« Alkoholiker
- Personen mit alkoholbedingten Organkrankheiten
- Personen mit chronischen Leberkrankheiten
- Personen, in deren Familie Alkoholismus vorkommt
- Frauen mit einem genetischen Risiko für Brust- oder Eierstockkrebs

Dieser Personenkreis sollte sich grundsätzlich des Alkohols enthalten.

Das Schema richtet sich auch nicht an Menschen, die aus religiösen oder ethischen Gründen keinen Alkohol trinken.

Risikofaktoren für eine koronare Herzkrankheit (KHK)

(nach den Richtlinien des Cholesterin-Aufklärungsprogramms der USA):

- familiäre Belastung durch KHK (Vater oder Bruder unter 55 Jahren an KHK erkrankt; Mutter oder Schwester unter 65 Jahren an KHK erkrankt)
- Rauchen
- hoher Blutdruck
- Gesamtcholesterin über 200
- HDL-Cholesterin unter 35 (bei HDL über 60: einen Risikofaktor abziehen)
- Frauen ab 50 Jahre, Männer ab 40 Jahre

Frauen unter 50 Jahren / Männer unter 40 Jahren

jetziges Trinkverhalten	Risiken für koronare Herzkrankheit (KHK)	Empfehlung
abstinent	höchstens 1 Risikofaktor	aus Gesundheitsgründen keine Veränderung
	hat Diabetes oder KHK oder mindestens 2 Risikofaktoren	sollte 1–3 Drinks pro Woche erwägen
leicht bis mäßig (Frauen: bis zu 1 Drink täglich Männer: bis zu 2 Drinks täglich)	höchstens 1 Risikofaktor	aus Gesundheitsgründen keine Veränderung
	hat Diabetes oder KHK oder mindestens 2 Risikofaktoren	aus Gesundheitsgründen keine Veränderung
stark (Frauen: mindestens 2 Drinks täglich; Männer: mindestens 3 Drinks täglich)	höchstens 1 Risikofaktor	kein Alkohol mehr
	hat Diabetes oder KHK oder mindestens 2 Risikofaktoren	kein Alkohol mehr oder höchstens 1 Drink täglich

Frauen ab 50 Jahren / Männer ab 40 Jahren

jetziges Trinkverhalten	Risiken für koronare Herzkrankheit (KHK)	Empfehlung
abstinent	außer dem Alter kein Risikofaktor	aus Gesundheitsgründen keine Veränderung
	hat Diabetes oder KHK oder neben dem Alter mindestens 1 Risikofaktor	sollte 1–3 Drinks pro Woche erwägen
leicht bis mäßig (Frauen: bis zu 1 Drink täglich; Männer: bis zu 2 Drinks täglich)	neben dem Alter höchstens ein Risikofaktor	aus Gesundheitsgründen keine Veränderung
	hat Diabetes oder KHK oder neben dem Alter mindestens 2 Risikofaktoren	falls bisher weniger als 1 Drink täglich: nun 1 Drink pro Tag; andere: aus Gesundheitsgründen keine Veränderung
stark (Frauen: mindestens 2 Drinks täglich; Männer: mindestens 3 Drinks täglich)	außer dem Alter kein Risikofaktor	kein Alkohol mehr
	hat Diabetes oder KHK oder neben dem Alter mindestens 1 Risikofaktor	Männer: kein Alkohol mehr oder höchstens 2 Drinks täglich Frauen: kein Alkohol mehr oder höchstens 1 Drink täglich

bedingter Probleme mit der von der Gesamtbevölkerung konsumierten Alkoholmenge korreliert.

Besser wären aber auf den Einzelfall abgestimmte Empfehlungen. Wer ein hohes Risiko für eine koronare Herzkrankheit trägt, nicht mit Missbrauch rechnen muss und daran gewöhnt ist, gelegentlich ein Gläschen zu trinken, dem muss man davon nicht abraten. Das dürfte für viele Menschen gelten. Sie finden das richtige Maß und sollten dabei bleiben. Natürlich ist es für diese Gruppe noch wichtiger, die üblichen Gesundheitsempfehlungen zu befolgen, also sich gesund zu ernähren, viel zu bewegen, Übergewicht, Diabetes, Bluthochdruck und einen zu hohen Cholesterinspiegel wirksam zu bekämpfen – ▷

Dunkles Rot oder kühles Blond

Der Mythos vom Rotwein

An sich senken offenbar alle Alkoholika bei mäßigem Konsum das Risiko für eine koronare Herzkrankheit, ob Bier, Wein oder Spirituosen. In Frankreich, wo man generell viel Rotwein trinkt, sterben aber anteilig nur halb so viele Menschen an den Folgen einer Koronarerkrankung wie in den Vereinigten Staaten, trotz vergleichbarem Fettkonsum und ähnlicher sitzender Lebensweise. Bewirken das im Rotwein enthaltene Stoffe, wie Antioxidantien?

Eine dänische Studie mit fast 13 000 Teilnehmern, die über zwölf Jahre lief, kam zu dem Schluss, dass Weintrinker seltener an einer koronaren Herzkrankheit sterben als Menschen, die andere Alkoholika bevorzugen. Nach Erhebungen von meinen Kollegen Mary Anne Armstrong, Gary D. Friedman und mir tragen Wein- und Biertrinker ein geringeres Risiko als Liebhaber hochgeistiger Getränke, wegen einer Koronarerkrankung stationär behandelt zu werden oder daran zu sterben. In diesen Statistiken erfassten wir fast 130 000 Kalifornier.

Kürzlich konnten wir zeigen, dass Menschen, die täglich Wein trinken, besser abschneiden als Biertrinker oder Liebhaber scharfer Getränke, die gleich viel Alkohol konsumieren: Ihr Risiko für Tod durch koronare Herzkrankheit ist um 25 beziehungsweise 35 Prozent geringer. Zwischen Rot- und Weißwein fanden wir allerdings keinen Unterschied.

Nun unterscheidet sich die Lebensführung von Weintrinkern, Bierliebhabern und Konsumenten harter Alkoholika im Allgemeinen beträchtlich. Zum Beispiel ernähren sich Dänen, die gern Wein trinken, oft auch gesund mit viel Obst und Gemüse, Fisch, Salat und Olivenöl, und sie haben einen höheren sozioökonomischen Status und einen höheren Intelligenzquotienten – beides Marker für bessere Gesundheit. Von den Teilnehmern der kalifornischen Studien rauchten die Weintrinker weniger und hatten einen höheren Bildungsstand. Generell tranken sie maßvoller als die Bier- oder Whiskeykonsumenten.

Noch ist nicht entschieden, inwieweit manche Alkoholika tatsächlich gesünder sind als andere. Vielleicht hat die scheinbar größere Wirkung gar nicht der Rotwein mit seinen besonderen Inhaltsstoffen, sondern die Art des Konsums. Franzosen trinken Wein gern – langsam – während des Essens.

▷ und auf das Rauchen zu verzichten. Doch auf die Liste gehört auch der Hinweis, dass ein wenig Alkohol für das Herz gut sein kann.

Andererseits sollte man Menschen, die keinen Alkohol trinken, niemals vorschnell zum Glas Wein der Gesundheit wegen raten. Die meisten haben für ihre Haltung sehr gute Gründe. Doch es gibt Ausnahmen: Da wäre etwa der Herzpatient, der seine Lebensführung komplett umstellt, zu rauchen aufhört, sich an leichte, gesunde Kost gewöhnt und mit Sport beginnt. In bester Absicht verzichtet er nun auch auf das gewohnte Bier oder Glas Wein am Abend. Das aber darf er sich guten Gewissens weiter gönnen.

Ein anderer Fall sind Personen, die nur gelegentlich Alkohol zu sich nehmen. Besonders Männer über vierzig und Frauen über fünfzig mit einem hohen Risiko für eine koronare Herzkrankheit und einem geringen für Missbrauch oder alkoholbedingte Erkrankungen sollten erwägen, ob sie sich nicht täglich einen Drink gönnen sollten. Dabei müssen Frauen jedoch bedenken, dass möglicherweise das Brustkrebsrisiko steigt. Mehrere Studien wiesen dies für starken Alkoholkonsum nach, eine sogar für leichten. Zwar tritt nach den Wechseljahren Brustkrebs seltener auf als eine koronare Herzkrankheit, aber die Gefahr eines bösartigen Tumors hat doch hohes Gewicht. Das gilt in der Risikoabwägung noch mehr für junge Frauen, die in dem Alter selten zu einer koronaren Herzkrankheit neigen. Ohnehin liegt für Frauen die Obergrenze mäßigen Trinkens schon bei einem Drink täglich.

An sich gibt es nur eine klare Botschaft: Starke Trinker sollten sich einschränken oder mit dem Alkoholkonsum ganz aufhören. Gleiches gilt für alle Personen, die Risikofaktoren tragen, ob das nun Alkoholprobleme in der Familie oder in der eigenen Vergangenheit sind oder etwa Leberkrankheiten. Alle anderen müssen die Vorteile und Risiken im Einzelfall abwägen. Für diesen Kreis haben der Herz- und Gefäßchirurg Roger R. Ecker vom Summit-Medizinzentrum in Oakland (Kalifornien) und ich ein Entscheidungsschema entworfen, an dem sich Ärzte und Patienten orientieren können (siehe Seite 67). Ich bin der Ansicht, dass ein Teil der Bevölkerung einen Nutzen davon hat, regelmäßig kleine Mengen Alkohol zu trinken, und dass sich angeben lässt, wie viel jedem wahrscheinlich gut tut.

Die alten Griechen kannten das Motto, in allen Dingen Mäßigung zu üben. Auch für alkoholische Getränke gilt, das rechte Maß zu finden. ◁

Arthur L. Klatsky arbeitet in Oakland (Kalifornien) in der Forschungsabteilung des Kaiser Permanente Medical Center. Früher leitete er dort die kardiologische Abteilung und stand der Einheit für Koronarpatienten vor. Heute wirkt er als Berater und externer Forschungsleiter.

Alcohol and Coronary Heart Disease. Von G. Corrao et al. in: Addiction, Bd. 95, Heft 10, S. 1505, Oktober 2000.

Epidemiology of Coronary Heart Disease – Influence of Alcohol. Von Arthur L. Klatsky in: Alcoholism: Clinical and Experimental Research, Bd. 18, Heft 1, S. 88, Januar 1994.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

MARCO ANTONIO PACHECO / RAÍCES

Gartenkünstler in der Neuen Welt

Das Lustwandeln in weitläufigen Gärten ist keine Erfindung europäischer Fürsten – auch Azteken ergingen sich in prachtvollen Parkanlagen voller leuchtender Blüten. Dabei hatten die Pflanzenparadiese der Neuen Welt auch praktische Aspekte: Sie versorgten die Herrschenden mit Nahrung und Heilpflanzen.

Von Doris Heyden

Wenn die Azteken ihre Götter mit religiösen Festen ehrten, gehörten üppige Blumengaben unbedingt dazu. Auch ihren Fürsten boten sie blühende Gestecke, Girlanden und Halsketten dar – ein Brauch, der noch heute bei den Festen der Dorfgemeinschaften lebendig ist.

Die Azteken liebten Blumen so sehr, dass sie ihnen eigene Zeremonien widmeten. So war etwa der siebte Monat des aztekischen Jahres – *tecuilhuitontli* – ganz dem Genießen und Verschenken von Blumen gewidmet. Der Dominikaner Diego Durán (1537–1587/88) berichtet: »Die Fürsten verließen ihre Häuser nicht und dachten an nichts anderes, als umgeben von Rosen zu verweilen.« Dem Regengott Tláloc, der die Pflanzen wachsen ließ, wurden zum Fest *tozoztontli* die ersten Blüten des Jahres dargebracht, und die für Blumen zuständigen Beamten feierten zu Ehren ihrer Göttin Coatlicue ein Fest, zu dem sie ihr Arrangements aus Blumen opferten.

Die üppige Flora Mittelamerikas machte es den Azteken leicht, ihrer Begeisterung für alles Blühende zu frönen. Durch verschiedene Quellen sind uns die wichtigsten Pflanzen und ihre Bedeutung überliefert. Zum Beispiel wurde in der Dichtung der Urmexikaner häufig die *cacaloxóchitl* besungen, ein reich blühendes Hundsgiftgewächs (fachlich: die Art *Plumeria acutifolia*, eine Frangipani). Mit ihr wurde das Fest *tlaxochimaco* begangen; wie die meisten Pflanzen wurde sie aber auch in der Heilkunde verwendet. Im *Codex Badianus* – dem ersten Pflanzen-

Mexikos Pflanzen- und Tierwelt beschrieb der spanische Arzt Francisco Hernández in seiner *Historia natural de Nueva España*. Von 1571 bis 1577 hatte er dazu alle verfügbaren Informationen zur Natur Zentralamerikas gesammelt.

und Arzneibuch der Neuen Welt aus dem Jahre 1552 – heißt es, die *cacaloxóchitl* enthalte einen Duft, der die vom Staatsdienst erschöpften Beamten stärke.

Die *eloxóchitl* oder mexikanische Magnolie (*Magnolia schiedeana*, Bild Seite 75 links) war als Schlafmittel beliebt. Anwendung: eine Prise der Blüte in das ebenfalls aztekische Getränk Kakao gemischt. Größere Mengen galten als giftig und sollten zum Wahnsinn führen. Auch die *eloxóchitl* zählt zu den 22 Blüten und Pflanzen, die laut *Codex Badianus* zur Stärkung der Beamten dienten. Die erschöpften Staatsdiener rieben den Körper mit einer Mischung aus Blütensaft und dem Blut wilder Tiere ab.

Auch die *cempoalxóchitl*, unsere Tagetes *(Tagetes spec.)*, wird in den Chroniken oft erwähnt. Sie galt in Mexiko schon immer als Totenpflanze, denn man schrieb ihr die Kraft zu, die Seelen der Toten anzuziehen und zu führen.

Weil Kriege meist im Zeichen der Sonne standen, war die Sonnenblume *(Helianthus annuus)* ein Symbol für derartige Auseinandersetzungen. Aztekisch heißt sie *chimalxóchitl*, übersetzt »schildförmige Blüte«. Wie einige Historiker glauben, verdankt sie diese Bezeichnung ihrem Kranz aus gelben Blütenblättern, durch den sie den Rundschilden von Gottheiten wie Opochtli, Tláloc und Huitzilopochtli ähnelte, die nach alter Sitte mit Blumen, Quasten und Federn geschmückt wurden.

Die Orchideenart *tzacutli* oder auch *zautle (Epidendrum pastoris)* schließlich lieferte einen Leim, mit dem die Azteken für zeremoniellen Festschmuck Federn an Stoffe und Schilde klebten und aus Edelsteinen und Muscheln Mosaike legten. Auch in der Goldschmiedekunst, als Bindemittel in der Malerei und bei der Herstellung von Kleinwaffen wie Pfeilen fand der Pflanzenklebstoff Verwendung.

Nicht wenige Blumen wurden in Mexiko gezüchtet und eroberten von dort die ganze Welt. Eine davon erfreut sich bei Gartenbesitzern immer noch großer Beliebtheit: die Dahlie, die schon der Eroberer Hernán Cortés (1485–1547) in den Gärten der Neuen Welt bewunderte. Abbé Antonio José Cavanilles, der Direktor des Botanischen Gartens in Madrid, stellte sie 1791 in Europa zu Ehren des schwedischen Botanikers Andreas Dahl (1751–1798) als *Dahlia pinnata* vor. Heute ist die Dahlie die Nationalblume Mexikos.

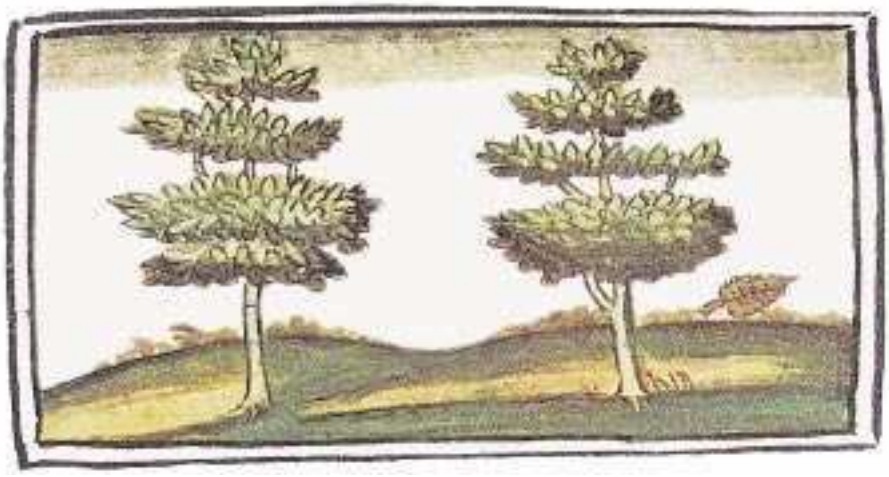
Schöne Pflanzen als Tribut

Die Gartenkunst beschränkt sich jedoch nicht auf Duft und Ästhetik. Außer Mais, der für die tägliche Nahrung eine große Rolle spielte, kultivierten die Azteken Baumwolle, Kakao, Salbei, Chili- und Nelkenpfeffer sowie die Agave, die sie in vielfältiger Weise nutzten: zum Einzäunen der Äcker, um aus dem Blütenschaft Dachbalken zu fertigen oder um mit den Blättern die Dächer zu decken. Auch Papier, Garn, Nadeln, Kleidung, Schuhe und Seile stellten sie aus der Pflanze her. Der Pflanzensaft war Grundlage für den Pulque, ein durch Gärung gewonnenes alkoholisches Getränk. Aus dem Schaft und dem dickeren Teil der Blätter wurde im Erdofen eine schmackhafte Speise zubereitet. Zudem gewannen die Azteken aus den Blättern eine Arznei, die gegen verschiedene Krankheiten wirksam sein sollte – insbesondere gegen Erkrankungen der Harnwege.

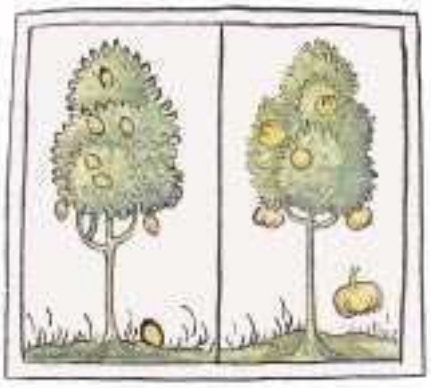
Dem Franziskaner Toribio Motolinía (1490–1569) zufolge ließen die eingeborenen Fürsten Arzneipflanzen aus weit entfernten Gebieten kommen, um ihre Heilkraft zu erforschen, und der Herrscher Motecuzoma – besser bekannt als Montezuma – »hielt seine Ärzte an, Versuche mit den Arzneikräutern durchzuführen und mit denen, über die sie am besten Bescheid wussten und die am besten erprobt waren, die Edelmänner seines Hofs zu heilen.«

Um den Nachschub an schönen und wertvollen Pflanzen zu sichern, verlangten die Azteken sogar von eroberten Gebieten Pflanzen als Tribut. Angeblich haben sie sogar einmal einen Krieg aus die- ▷

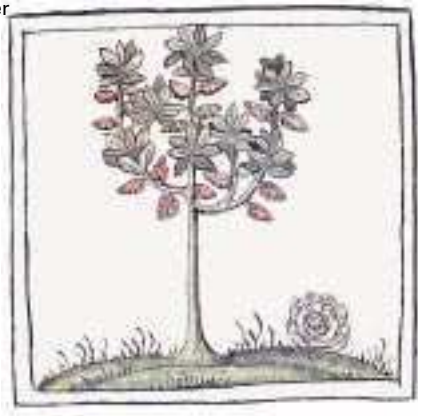
Nicht nur in der Hauptstadt Tenochtitlan unterhielt die Elite der Azteken Parks und Nutzgärten.



Teocuáhuitl *(Cederla odorata)*, Spanische Zeder



Gelber Sapotillbaum *(Lucuma salicifolia)*



Kakaobaum *(Theobroma cacao)*

MARCO ANTONIO PACHECO / RAÍCES (ALLE ILLUSTRATIONEN AUS DEM »CODEX FLORENTINO«, 1577; BIBLIOTECA MEDICEA LAURENZIANA, FLORENZ)

»Die Wälder sind so lieblich, schön und voller Bäume und Kräuter mit vielen verschiedenen Blüten. Es gibt Gewässer, Quellen und einen Fluss zur Bewässerung. Die Erde ist fruchtbar, und es ist ein ruhiger und angenehmer Ort. Man hat dort Bäume mit intensiv duftenden und wertvollen Blüten angepflanzt.« Der Franziskanermönch Bernhardino de Sahagún beschrieb 1577 in einem zwölfbändigen Werk die Geschichte, Kultur, Religion und Gesellschaft der Azteken derart sachlich und ohne Parteinahme für die Eroberer, dass seine Schriften zwei Jahre nach Erscheinen von den Behörden beschlagnahmt wurden.

sem Grunde angezettelt: Glaubt man dem 1615 veröffentlichten Bericht des Franziskaners Juan de Torquemada, haben die Azteken das Gebiet Tlaxiaco im heutigen Bundesstaat Oaxaca unter dem Vorwand erobert, dass dort der *tlapalizquixóchitl* wuchs, ein Baum mit herrlichen, duftenden Blüten.

Begeisterte Invasoren

Freilich überließen die Mächtigen die stete Versorgung mit Blumen nicht nur dem Kriegsglück. Ebenso wie Heilpflanzen und Gemüse züchteten sie die Zierpflanzen in Gärten – und schufen damit gleichzeitig Oasen der Ruhe und Entspannung. Der spanische Kartograf Pedro Mártir de Anglería schrieb dazu: »Zu ihrer Zerstreuung besitzen sie herrliche Landgüter mit Blumen- und Obstgärten, mit vielen Arten von Kräutern, Rosen und wohl riechenden Blumen. Sie verstehen auch die Kunst, die Beete zu pflegen, und sie umzäunen diese mit Schilf, um zu verhindern, dass jemand eindringt und die entzückenden Pflanzen niedertrampelt oder ausreißt. Sie haben auch Teiche in den Gärten, in denen Schwärme von verschiedenen Fischen schwimmen und an denen eine Fülle von Wasservögeln lebt.«

Vor allem die königlichen Gärten von Tenochtitlan und Texcoco sowie die Nutzgärten der Fürsten von Itztapalapa und Huaxtépec waren weithin berühmt. Der Fürst von Itztapalapa bewohnte eine riesige Palastanlage aus mehreren Herrenhäusern mit wunderschön gestalteten Gängen, Sälen und Terrassen, über denen fein gearbeitete Markisen aus Baumwollstoff gespannt waren. Dazwischen erstreckten sich etliche Blumengärten und ein großer Nutzgarten, dessen Pracht, Ordnung und Schönheit die spanischen Konquistadoren in Erstaunen versetzte.

Auch Bernal Díaz del Castillo, spanischer Historiker und einer der wichtigsten Chronisten der Eroberung Mexikos, schwärmt vom Garten von Itztapalapa: »Mit seiner Vielfalt an Bäumen und Gerüchen, die jeder davon hatte« und mit seinen Wegen voller Blumen hätte er sich eine solche Anlage nie träumen lassen. Es habe einen Kanal gegeben, auf dem die großen Kanus vom See bis in die Gartenanlagen hineinfuhren. So konnten die Insassen den Anblick genießen, ohne ihren Fuß auf festes Land zu setzen.

Hernán Cortés seinerseits beschrieb das große Süßwasserbecken im Garten so: »… nahezu quadratisch, und seine Wände aus wunderschön gearbeitetem Steinwerk, und um es herum ein Weg mit sehr gut gearbeitetem Pflasterboden – so breit, dass vier Personen auf ihm nebeneinander spazieren gehen können … auf der anderen Seite des Gehwegs, zur Mauer des Gartens zu, steht alles voll Schilf … und dahinter viele Arten von Bäumen und duftenden Pflanzen. Im Wasserbecken tummeln sich zahlreiche Fische und Vögel, wie etwa Stock- und Krickenten und andere Arten von Wasservögeln – so viele, dass sie oft das Wasser nahezu bedecken.«

Das Athen Amerikas

Der Aztekenherrscher Motecuzoma Xoyocotzin (Montezuma II., 1502–1520) selbst besaß in seinem Palast in Tenochtitlan Gärten. Überdies standen ihm in anderen Stadtteilen Lustgärten, Parks und Nutzgärten zur Verfügung – etwa der große Zypressenwald Chapultepec und ein weitläufiger Garten in El Peñón im Osten der Stadt, der im Zuge der Eroberung in den Besitz von Cortés überging.

Von den Pocken besiegt

Die Bewohner des Hochtals von Mexiko nannten sich selbst Mexi'ca' und wurden deshalb von den spanischen Eroberern als Mexikaner bezeichnet. Erst im 18. Jahrhundert prägte der italienische Jesuit Lorenzo Boturini in seiner Geschichte Mexikos den Begriff »Azteken«.

Historiker gehen heute davon aus, dass die Azteken ursprünglich als Jägernomaden im Nordwesten des heutigen Mexiko lebten. So ist beispielsweise ihre Sprache, das Nahuatl, mit Dialekten dieser Region und einiger Gebiete im Südwesten der Vereinigten Staaten verwandt.

Mitte des 12. Jahrhunderts machten sich die Vorfahren der Urmexikaner auf den Weg in Richtung Süden, der Legende nach auf Weisung ihres Gottes Huitzilopochtli. Mehr als hundert Jahre später erreichten sie etwa 65 Kilometer nordwestlich des heutigen Mexico City eine Ruinenstadt: Tula, den 1169 zerstörten Hauptsitz der Tolteken. Der immer noch lebendige Ruhm der Stadt veranlasste das Herrschergeschlecht der Azteken, ihre Ahnen fortan von diesem Stamm abzuleiten.

Am Texcocosee angekommen, der damals weite Teile des Tals von Mexiko füllte, mussten sie zunächst Auseinandersetzungen mit ansässigen Völkern überstehen, bis sie auf einer Insel das ersehnte göttliche Zeichen erkannten: einen Adler mit einer Schlange, der auf einem Kaktus saß. An jener Stelle gründeten sie Mitte des 14. Jahrhunderts Tenochtitlan, die künftige Hauptstadt. Auf dem Tempelplatz und in ihrem Palast liefen die Fäden der politischen Macht zusammen, während der Stadt Tlatelolco im Norden der Insel der Handel oblag.

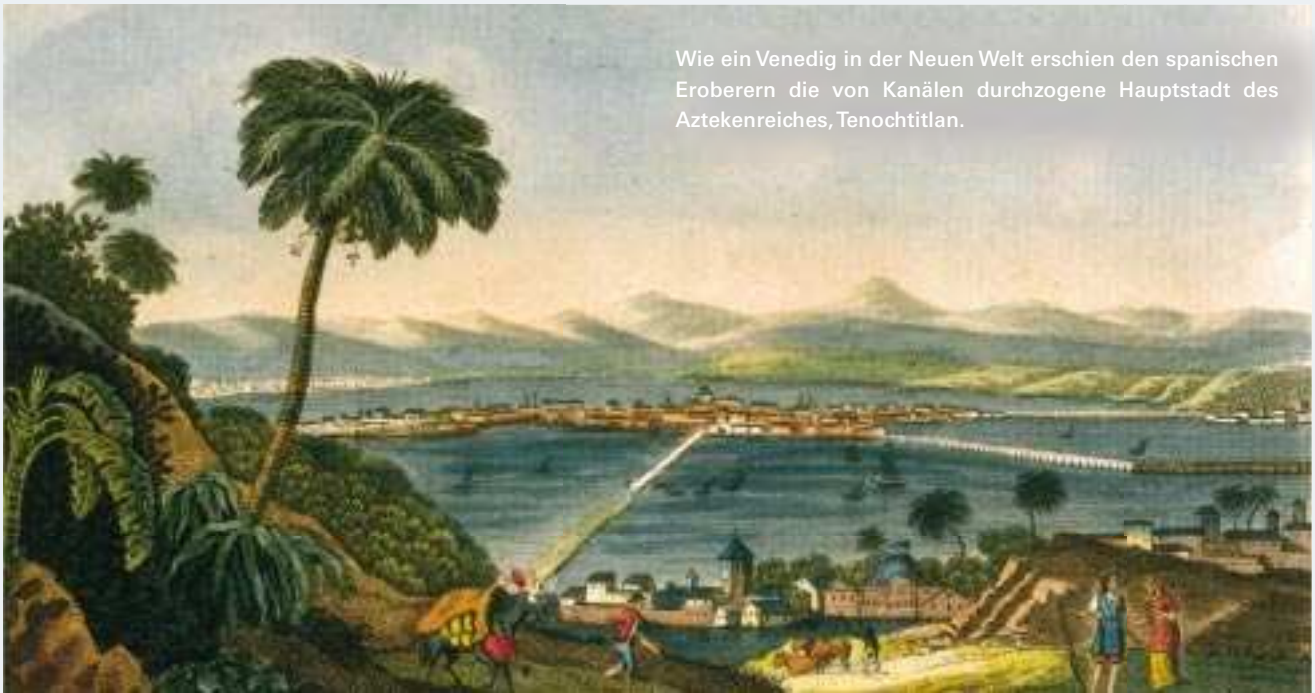
Anfangs beherrschten die Tepaneken das Hochtal, doch 1433 gelangten die Neuankömmlinge gemeinsam mit dem Stamm der Acolhua und einer Tepaneken-Fraktion an die Macht. Bald errang Tenochtitlan die Vormachtstellung im Bündnis, 1473 schluckte die expandierende Stadt auch Tlatelolco.

Zur Blütezeit lebten etwa 100 000 Menschen in der Metropole Tenochtitlan. Ein rasterartiges Netz von Kanälen durchzog die Stadt – da Fuhrwerke und Reittiere unbekannt waren, dienten Boote dem Warentransport. Sümpfe wurden entwässert, immer wieder Schlamm und Schilf abgelagert, um neuen Grund zu gewinnen. Der Zugang zur Inselstadt erfolgte über Dämme, und ein Aquädukt versorgte die Stadt vom Ufer her mit Trinkwasser. Abfälle und Fäkalien wurden zur Düngung der Felder verwendet oder in den See geleitet, wo eine Strömung sie davontrug.

Das Herrschaftsgebiet wurde so weit ausgedehnt, wie es Logistik und Verwaltung erlaubten. Doch am 8. November 1519 erreichte der spanische Feldherr Hernán Cortés (1485–1547) die Hauptstadt. Der amtierende König Montezuma II. begrüßte die Spanier respektvoll und wies ihnen einen Palast innerhalb der Stadtmauern zu. Doch die Gäste nahmen einen indianischen Überfall auf die spanische Kolonialstadt Veracruz als Vorwand, um den Herrscher festzusetzen. Es gibt keine befriedigende Erklärung, warum sich dieser mächtige und gefürchtete Mann fügte. Dass er in den Spaniern die von einem Mythos angekündigten weißen Götter sah, wie gern berichtet wird, bezweifeln Experten heute.

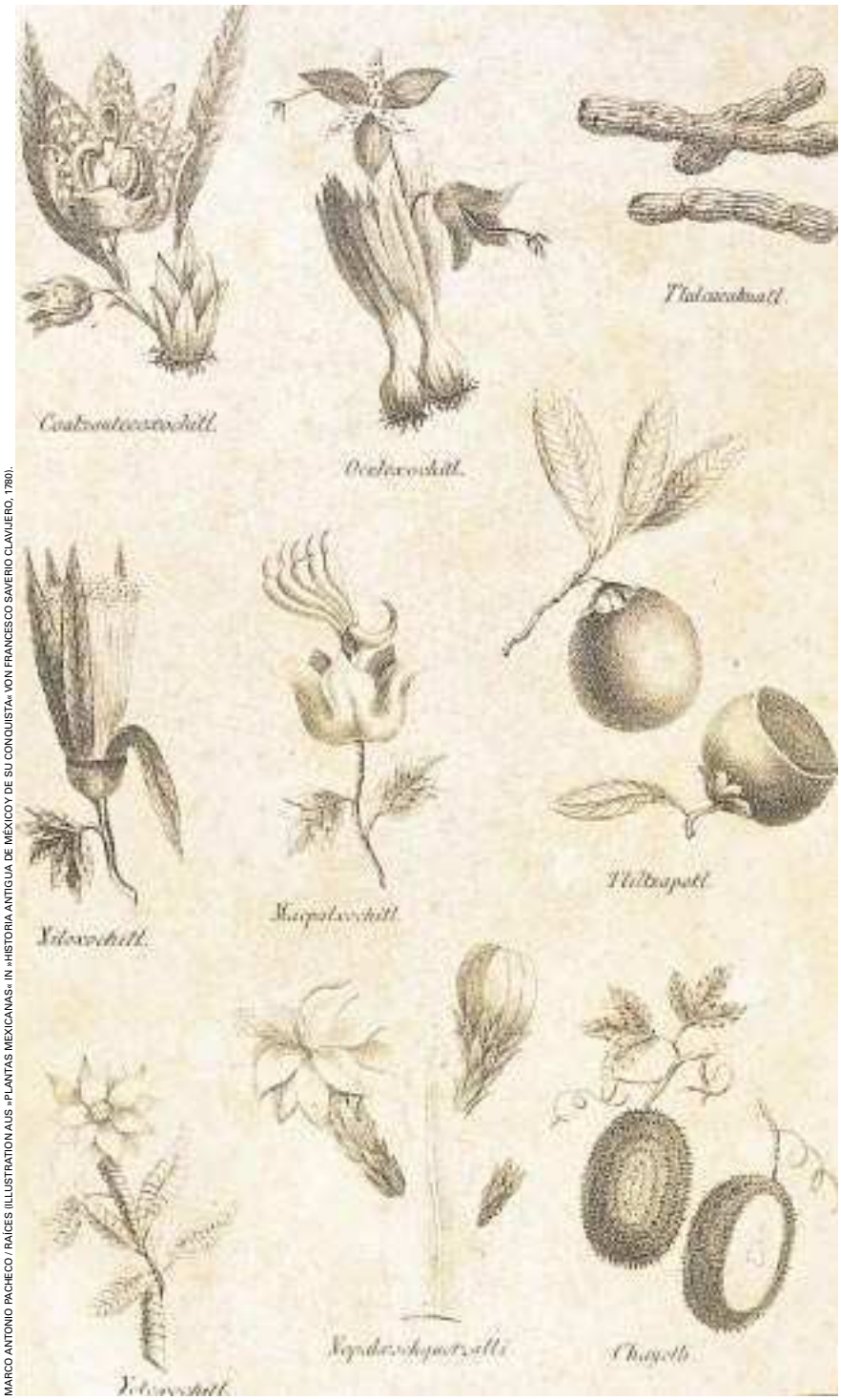
Die Bevölkerung Tenochtitlans rebellierte im folgenden Jahr gegen die Eindringlinge, Montezuma starb. Die Spanier mussten unter schweren Verlusten und ohne die gestohlenen Schätze aus der Hauptstadt fliehen. Dort brachen bald die von den Europäern eingeschleppten Pocken aus und dezimierten die Bevölkerung. Im Mai 1521 kehrte Cortés zurück und belagerte das von der Epidemie geschwächte Tenochtitlan. Der neue König Cuauhtemoc, ein Neffe Montezumas, geriet am 13. August in Gefangenschaft. 1525 wurde er wegen der Beteiligung an einer angeblichen Verschwörung gehängt. Die Azteken hatten nunmehr ihren Führer verloren, die Spanier hingegen triumphierten militärisch wie organisatorisch. Mehr noch: Die Pocken hatten Tausende das Leben gekostet, die alten Götter waren kein Schutz gewesen. Apathie machte sich breit, und die einstigen Herrscher über das Tal von Mexiko mussten sich auf der untersten Stufe des neuen Gesellschaftssystems einrichten.

Klaus-Dieter Linsmeier



AKG BERLIN

Wie ein Venedig in der Neuen Welt erschien den spanischen Eroberern die von Kanälen durchzogene Hauptstadt des Aztekenreiches, Tenochtitlan.



MARCO ANTONIO PACHECO / RAÍCES (ILLUSTRATION AUS »PLANTAS MEXICANAS« IN »HISTORIA ANTIGUA DE MÉXICO Y DE SU CONQUISTA« VON FRANCESCO SAVERIO CLAVIJERO, 1780).

Der Jesuit Francesco Saverio Clavijero (1731–1787), als Missionar in Mexiko, berichtete: »Abgesehen davon, dass sie Mais und andere Pflanzen aussäten, besaßen die Mexikaner auch einen ausgezeichneten Geschmack bei der Kultur ihrer Nutz- und Lustgärten, in denen wohl geordnet Obstbäume, Heilkräuter und schließlich Blumen gediehen, die vielfach Verwendung fanden, weil die Mexikaner so großes Wohlgefallen daran hatten und weil man sie traditionsgemäß als Gebinde Herrschern, Botschaftern und anderen wichtigen Persönlichkeiten darbot, abgesehen von den riesigen Mengen, die für den Götterkult ebenso gebraucht wurden wie zum Schmuck der Tempel und Hausaltäre.«

Auch außerhalb von Tenochtitlan unterhielten die aztekischen Herrscher große Prachtgärten, etwa in Atlixco im südöstlichen Hinterland und in Huaxtepec im Süden. Der Park von Huaxtepec erstreckte sich über mehr als drei Kilometer und es gab dort viele kleine Landhäuser, umgeben von wunderschönen Pflanzen. Ein Fluss, der sich im Garten entlangschlängelte, machte den Ort noch schöner und reizvoller.

Doch nicht nur die Azteken hatten die Gartenkunst weit entwickelt. Zu den berühmtesten Parkanlagen jener Zeit gehörte der Garten des Königs Nezahualcóyotl (1402–1472) in Texcoco, der Hauptstadt von Acolhuacan. Dieses Land grenzte an das Reich von Tenochtitlan und musste den aztekischen Königen Tribut entrichten. Nezahualcóyotl war ein Freund der Wissenschaften und Künste. Unter seiner Herrschaft entwickelten sich diese Disziplinen zu einer Blüte, die Texcoco später die Bezeichnung »Athen Amerikas« einbrachte. Der Herrscher erließ zum Beispiel einen auf Gewaltentrennung basierenden Gesetzeskodex, der auch von Tenochtitlan übernommen wurde. Laut dem Jesuiten Clavijero verhinderte er »die Zerstörung der Wälder, wodurch auch der Bevölkerung großer Schaden zugefügt worden wäre, indem er den Holzhändlern strikte Gren-

Mexikanische Magnolie
(Magnolia schiedeana)

Vanille
(Vanilla planifolia)

BIBLIOTECA NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA E HISTORIA / INAH (ILLUSTRATIONEN AUS DEM CODEX BADIANAO, 1552)

Cacaoxochitl
(Quararibea funebris)

zen setzte, deren Überschreitung mit harten Strafen geahndet wurde«. Sein Kunstsinn zeigte sich unter anderem im königlichen Palast, dessen Wände mit den Bildern von Pflanzen und seltenen Tieren seines Reichs bemalt waren.

Wasserspiele für den königlichen Hofstaat

Seinen berühmten Garten hatte der Herrscher um den kegelförmigen Cerro del Tetzcotzinco anlegen lassen, auf verschieden hohen, durch Treppen verbundenen Terrassen. Sein Nachfahre Fernando de Alva Ixtlilxóchitl (1568–1648), einer der wenigen Historiker aus den Reihen der Urmexikaner, beschreibt die Anlagen so: »In den Gärten standen prächtige, luxuriös gestaltete Schlösser. Es gab Springbrunnen, Wasserkanäle, Bewässerungsgräben, Teiche, Bäder und wunderschöne Labyrinthe mit Bäumen und Blumen aller Art, sogar solche aus fremden und fernen Landen. Der lieblichste Teil war der Hain auf dem Tetzcotzinco. Damit man seinen Gipfel ersteigen und ihn ganz durchwandern konnte, besaß er Stufen, die teils gemauert und teils in den Felsen geschlagen waren.«

Der Hain war auch der Ort, an dem sich der König am liebsten entspannte. Die Treppe, die zum Aussichtspunkt auf dem Gipfel des Cerro führte und die die Terrassen miteinander verband, besaß insgesamt 520 Stufen. Auf dem Weg nach oben passierte man unzählige Arten von Bäumen und große, überreich mit Blüten geschmückte Pflanzschalen – eine Gartenbautechnik, die heute verschwunden ist. Das Problem, dass es auf dem Gipfel des Tetzcotzinco kein Wasser gab, hatte der König auf seine Weise lösen lassen. Fernando de Alva Ixtlilxóchitl berichtet: »Das Wasser schaffte man für die Springbrunnen, Becken und Bäder herbei und leitete es auch über ein System von Bewässerungsgräben, um Blumen und Alleen des Parks mit Wasser zu versorgen.

Um das Wasser von seiner Quelle herbeizuleiten, musste man hohe Aquädukte errichten, die sich in unglaublicher Erhabenheit von einem Berg zum nächsten erstreckten. Von einem Sammelbecken aus stürzte ein künstlicher Wasserlauf über zahlreiche Felsen und verspritzte dabei Wasser über den Garten voll duftender Blumen aus heißen Ländern, gerade als ob es regnete. Der ganze Park bestand aus Bäumen und wohl riechenden Blumen, und viele Vögel lebten darin. Für Dekoration und Bedienung in den Palästen der königlichen Lustgärten und Wälder waren die umliegenden Dorfgemeinschaften zuständig, die sich dabei abwechselten. Jedes Dorf versah den Dienst ein halbes Jahr lang.«

Heute liegt diese einst so blühende Landschaft wüst, und die Natur hat jenen Ort zurückerobert, der den Königen von Tetzcoco heilig war. Von dem Aquädukt blieb nur die Trasse erhalten. Trotzdem kann man immer noch die Großartigkeit des Bauwerks erahnen, einer in der prähispanischen Welt einzigartigen Ingenieurleistung. ◁

»Nicht zu vergessen die Gärten [des Montezuma] mit vielen Arten von Blumen und duftenden Bäumen, ihre Harmonie, die Promenaden, die Zisternen, Süßwasserteiche, ein Flüsschen, das von einem Ende zum anderen fließt. Es gab Bäder, viele verschiedene kleine Vögel, die sich im Geäst der Bäume tummelten, und nützliche Heilkräuter. Es war sehenswert! Viele Gärtner arbeiteten dort, und ein Mauerwerk war angefertigt worden.« (Bernal Díaz del Castillo, 1568)

Die Anthropologin **Doris Heyden** ist Mitarbeiterin der Abteilung für Ethnologie und Sozialanthropologie des mexikanischen Nationalinstituts für Anthropologie und Geschichte (INAH).

© Arqueología Mexicana

Die Eroberung von Mexiko. Von Hugh Thomas. Fischer Taschenbuch-Verlag, Frankfurt 2000.

Die Azteken. Geschichte, Kultur, Religion. Von Hanns J. Prem. Verlag C. H. Beck, München 1999.

Die Kunst der Azteken und ihrer Vorläufer: von Teotihuacán bis Tenóchtitlan. Von Henri Stierlin, Belser-Verlag, Stuttgart 1997.

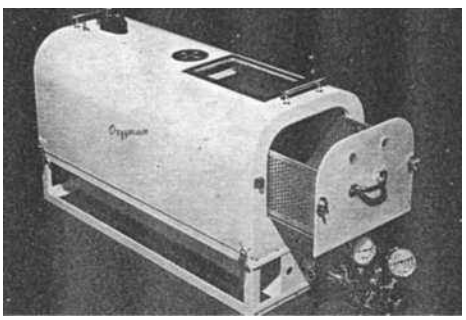
El Jardín de Itztapalapa. Von Ana Mariía L. Velasco Lozano. In Arqueología Mexicana, Band 10, Heft 57, 2002.

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE

WISSENSCHAFT IM RÜCKBLICK

Tragbarer Brutkasten

Um das Risiko beim Transport einer Frühgeburt zu verringern, hat die Firma Oxygenaire einen elektrisch beheizten tragbaren Sauerstoff-Brutapparat entwickelt. Das Gerät kann aus dem Stromnetz aufgeheizt werden, zur Aufrechterhaltung der gewünschten Temperatur dient die Batterie des Krankenwagens oder eines anderen Autos, mit dem das Kind transportiert wird. Selbstverständlich ist eine thermostatische Regelung vorgesehen. Ist zusätzlich Sauerstoff notwendig, so kann eine kleine Sauerstoff-Bombe angebracht werden. Durch ein Fenster am Kopf des Apparates kann man das Kind beobachten, was dadurch erleichtert wird, daß das Innere des Brutapparates während der Benutzung beleuchtet wird. *(Die Umschau, 53. Jg., Heft 19, 1953, S. 601)*



◀ Der wärmeisolierte Brutapparat kann bequem von zwei Leuten getragen werden.

Pflanzen auf dem Mars?

Die Behauptung vom Vorhandensein einer Vegetation auf dem Mars hat in den letzten Jahren als einigermaßen gesichert Eingang in die Wissenschaft gefunden, obwohl die Existenzbedingungen auf diesem für Pflanzen ungünstig sind. … Troizkaja kommt zu folgendem Schlusse: … Wir haben kein Recht zu behaupten, daß es eine Vegetation auf dem Mars gibt. Die Existenzbedingungen sind dort so ungünstig für die Entwicklung einer Pflanzenwelt, daß man sie als ungeeignet ansehen darf. Für das Fehlen von Pflanzen auf der Marsoberfläche spricht auch der Mangel an molekularem Sauerstoff in der Marsatmosphäre. *(Naturwissenschaftliche Rundschau, 6. Jg., Heft 10, 1953, S. 426)*

Vom Wachstum der Fingernägel

An der Medizinischen Universitätsklinik Leipzig wurden Untersuchungen über das Wachstum der Fingernägel durchgeführt. Dabei stellte man fest, daß beim Rechtshänder die Nägel der rechten Hand schneller wachsen als die der linken und daß an beiden Händen die Wachstumsgeschwindigkeit beim Nagel des III. Fingers am größten ist. … Das Wachstum steigert sich, bis es in dem Abschnitt vom 20. bis 29. Lebensjahr mit etwa 0,123 mm pro Tag sein Maximum erreicht. … Im Winter vermindert sich das Fingernagelwachstum gegenüber dem Sommer um 8 bis 13%. Es ist ferner tagsüber stärker als nachts. Innerhalb der Tagesschwankungen liegt das Maximum in den Vormittagsstunden. *(Umschau, 53. Jg., Heft 19, 1953, S. 585)*

Ein neuer Brunnengeist!

Bei Untersuchungen des Wassers tiefer Brunnen … ist eine Entdeckung (!!) gemacht worden, welche eine Erklärung jener eigentümlichen … Eigenschaft des Wassers der Heilquellen ermöglichen dürfte. … Gewinnt man … das in der Heilquelle enthaltene Gasgemisch, so zeigt sich, dass die Gase radioaktiv sind. … Dass radioaktive Substanzen, ebenso wie Röntgen-Strahlen einen physiologischen Einfluss ausüben, ist experimentell nachgewiesen, und so liegt die Annahme nahe, dass jenes nur im frischen Heilquellenwasser in radioaktiver Form enthaltene Gas es ist, welches … jene physiologischen Wirkungen hervorbringt, auf denen die Heilkraft der Quelle beruht. *(Zeitschrift für die gesammte Kohlensäure-Industrie, IX. Jg., Nr. 20, 1903, S. 702)*

Plastische Kinematographbilder

Ein vervollkommneter kinematographischer Apparat ist von Dr. Doyen in Paris erfunden worden. … der gewöhnliche Kinematograph gibt nur Bilder in der Fläche und nicht den plastischen Charakter des Natureindrucks wieder. Diese Plastik hat nunmehr Dr. Doyen mit seinem neuen Apparat herausgebracht. Man konnte bei einer Vorführung den Phasen einer Operation genau folgen; der Eindruck ist so lebhaft, als ob man der Operation selbst beiwohnt. Deutlich sieht man die Hände des Operateurs, die sich vom Patienten abheben … die Naht der Fleischteile, das Hervorspritzen des Blutes … mit täuschender Lebenswahrheit. Der Apparat wird für das … Studium von sehr großer Nützlichkeit sein. *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 235, 1903, S. 112)*

Zweihundert Kilometer in der Stunde

Noch niemals ist ein menschliches Wesen auf der Eisenbahn so rasch befördert worden wie die Teilnehmer der Schnellbahnversuche am 6. Oktober auf der Militärbahn Marienfelde-Zossen. An jenem Tage wurde … mit dem elektrischen Schnellbahnwagen der Firma Siemens u. Halske eine Geschwindigkeit von 201 km in der Stunde erreicht. … Dieses Ereignis, das in der ganzen technischen Welt und weit darüber hinaus … Aufsehen erregt hat, ist, wie Kaiser Wilhelm in seiner Glückwunschdepesche … hervorhob, ein schöner Erfolg, den deutsche Tatkraft und Beharrlichkeit errungen haben. *(Illustrirte Zeitung, Nr. 3146, 1903, S. 570)*

◀ Zwar ist der Tacho nicht zu erkennen, doch war diese Lokomotive auf ihrer Testfahrt am 15. Oktober 1903 die schnellste der Welt.

REPORT

Nanoschichten für die Elektronik

Der nächste Computer soll noch schneller rechnen? Kein Problem, das Moor'sche Gesetz macht's möglich: Im Abstand von gerade mal 18 Monaten schrumpfen die Strukturen auf Prozessor- und Speicherchips auf die Hälfte. Diese scheinbare Selbstverständlichkeit beruht – kaum bekannt – auch auf immer dünneren Funktionsschichten.

SPEICHERCHIPS

1 Bit = 1 Atom

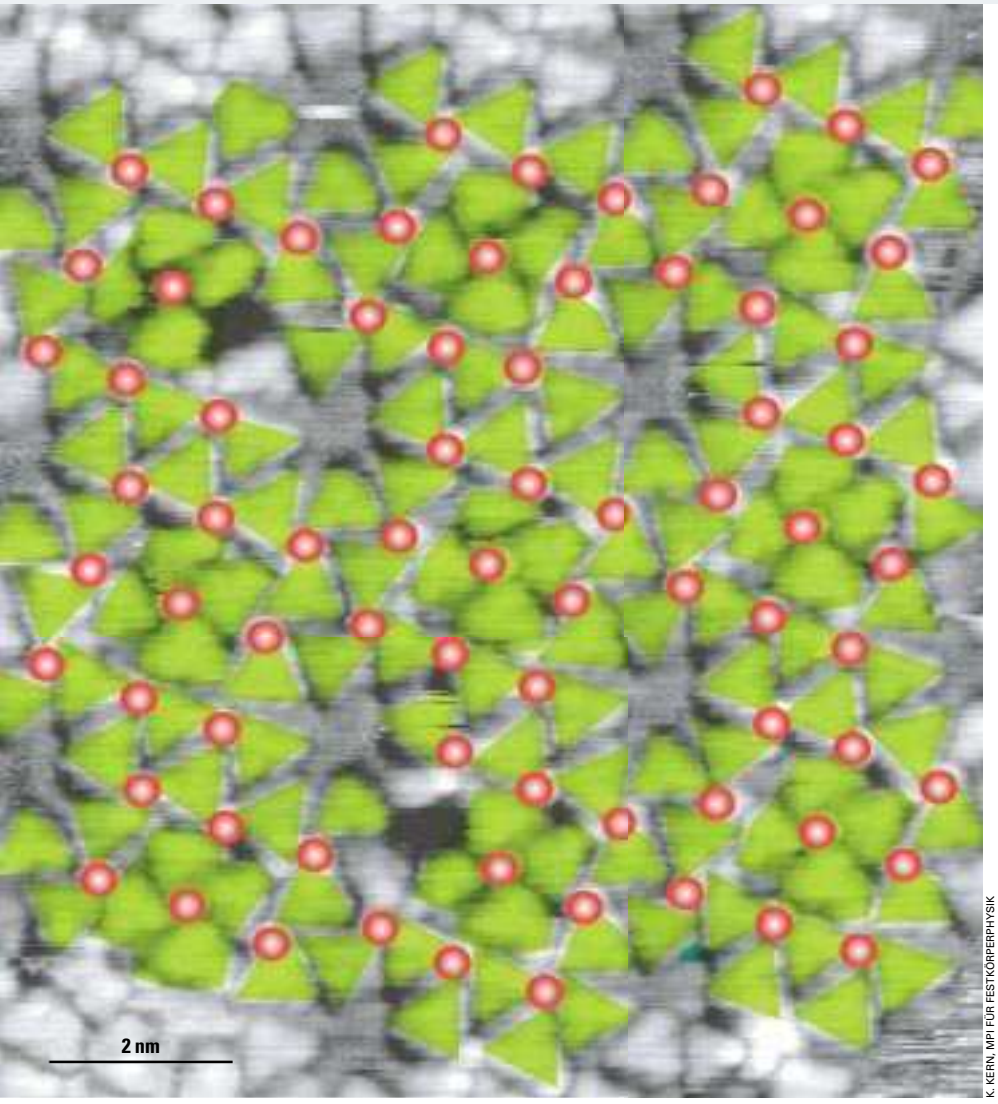
Schnell sollen Datenspeicher sein und mit einem langlebigen Gedächtnis versehen – Physiker erkunden die Grenzen des Möglichen.

Von Roland Wengenmayr

Für viele PC-Benutzer ist es lästige Routine: Nach dem Einschalten des Rechners vergehen oft Minuten, bis er betriebsbereit ist. Der Grund für dieses zeitaufwendige »Booten« ist die technische Notlösung Arbeitsspeicher. Denn Festplatten halten zwar große Datenmengen vor, sind aber vergleichsweise langsam. Deshalb muss der Computer zunächst Programme und Einstellungen von der Festplatte in den sehr viel schnelleren Arbeitsspeicher laden. Der erinnert seine Daten aber nur, so lange er mit Strom versorgt wird. Ein weiteres Problem: Die Kapazität dieser Halbleiter-Speicherbausteine ist deutlich geringer.

Das Gedächtnis einer Festplatte steckt in ihrer dünnen magnetischen Metallschicht, darin kann sie Informationen länger als zehn Jahre behalten. Doch ein magnetischer Kopf muss diese Daten lesen und schreiben. Dessen mechanische Positionierung braucht aber bei jedem Zugriff rund zehn Millisekunden. Zum Vergleich: Die DRAM-Chips (Dynamic Random Access Memory, etwa: dynamischer Speicher mit wahlfreiem Zugriff) heutiger Arbeitsspeicher speichern Bits als elektrische Ladung in miniaturisierten Kondensatoren. Dafür benötigen sie nur etwa zehn Nanosekunden (milliardstel Sekunden). Weltweit arbeiten Wissenschaftler daran, das Problem der Stromabhängigkeit durch eine hybride Speicherarchitektur zu lösen, bei der ein Material mit nichtflüchtigem Gedächtnis direkt in Halbleiterstrukturen eingebettet wird. Das würde den Datenzugriff um das Millionenfache beschleunigen. Da ein solcher Speicherchip elektrischen Strom nur zum Lesen oder Schreiben der Information braucht, nicht aber zu ihrem Erhalt, spart er zudem Energie und produziert weniger Abwärme. Zwar gibt es dergleichen schon, doch reicht die Speicherkapazität solcher Chips noch nicht aus.

Bei nichtflüchtigen Speicherchips werden die bewährten ferromagnetischen Materialien (nach lateinisch *ferrum* für



K. KERN, MPI FÜR FESTKÖRPERPHYSIK

Die ultimative Grenze der Miniaturisierung: Einzelne Eisenatome (rot hervorgehoben) sitzen im Zentrum von Komplexen aus organischen Verbindungen (grün), die sich auf einer hochreinen Kupferoberfläche zu einem Muster organisiert haben. Jedes Eisenatom könnte im Prinzip ein Bit magnetisch speichern (nm: Nanometer).

Eisen) noch lange eine Hauptrolle spielen. Ihre Eigenschaften verdanken sie einem komplexen, kollektiven Zusammenspiel ihrer Atome. Ferromagnetische Metalle bestehen aus mikroskopisch kleinen Domänen. Diese verhalten sich wie winzige Stabmagnete mit einem Nordpol und einem Südpol. Ein magnetisches Feld kann beide Pole vertauschen, die Stabmagneten also »umklappen« und so eine Information speichern. Ein gutes Speichermaterial zeichnet sich dadurch aus, dass dieses Umschalten schnell geht und wenig Energie verbraucht. Danach muss der Stabmagnet seine neue Orientierung – und damit das gespeicherte Bit – mindestens zehn Jahre stabil halten können.

Damit ein Material ferromagnetisch wird, braucht es mehrere Zutaten. Erstens müssen die Atome in der dünnen Schicht selbst kleine Magneten sein. Sie dürfen dieses »magnetische Moment« auch nicht verlieren, wenn sie sich zum dreidimensionalen, regelmäßigen Kristallgitter des Metalls zusammenschließen. Das kann passieren, weil vor allem die äußeren Elektronen der Atome den hier wirkenden Magnetismus erzeugen: mit ihrem Spin, den man sich als Kreiselbewegung des Elektrons vorstellen kann, und mit ihrer Bahn um den Atomkern. Schließen sich die Atome zum Kristallgitter des Metalls zusammen, sorgt ein Teil ihrer äußeren Elektronen für die dazu nötigen Bindungen.

Speicher ohne Gedächtnisverlust

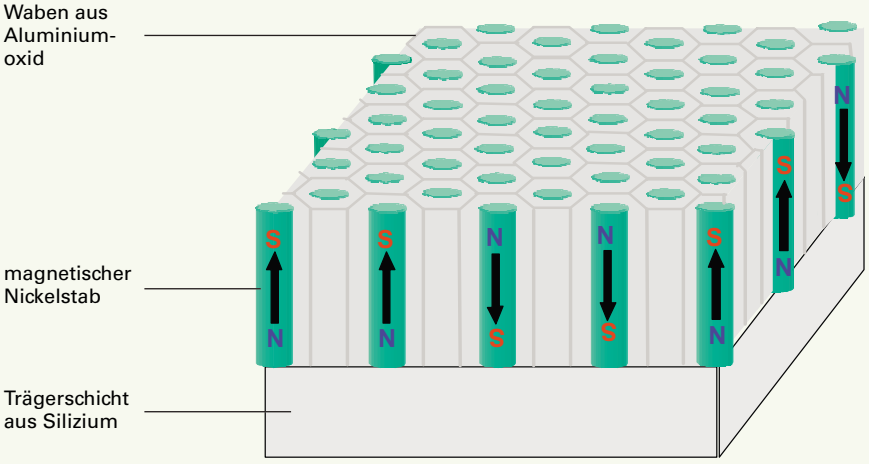
Dieser Zusammenschluss verändert aber deren Bahnen und kann damit ein zuvor vorhandenes magnetisches Moment ausschalten. Schließlich müssen sich die Momente auch noch kollektiv ausrichten und so einen permanenten Magneten ausbilden. Es ist also kein Wunder, dass es sehr wenige ferromagnetische Materialien gibt: Technisch relevant sind nur Eisen, Nickel, Kobalt und deren Legierungen.

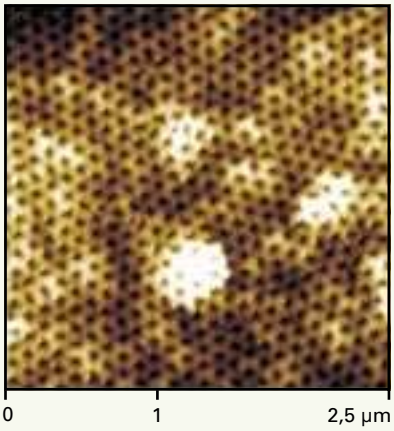
Doch es gibt Alternativen: die Ferroelektrika. In diesen Werkstoffen übernehmen elektrische Dipole die Rolle als Informationsträger. Diese winzigen »Antennen« mit einem positiv und einem negativ geladenen Ende entstehen durch komplexe Kräfte im atomaren Kristallgitter, die Teile davon gegeneinander verschieben. Dabei trennen sie positiv und negativ geladene Atome durch einen winzigen räumlichen Abstand; Physiker nennen das »remanente Polarisation«. Richten sich diese Antennen kollektiv aus, dann entsteht ein ferroelektrisches Material.

Es gibt bereits erste Chips auf dem Markt, auf denen ferroelektrisches Material in die hauchdünne Oberfläche des Siliziums eingebettet ist. Solche nichtflüchtigen Speicherbausteine heißen FeRAM oder FRAM (Ferroelectric Random Access Memory, ferroelektrischer Speicher mit wahlfreiem Zugriff). Sie verrichten in SmartCards ihren Dienst, die zum Beispiel als »intelligente« Kreditkarten nicht nur Daten speichern, sondern auch weiterverarbeiten können. Mit diesen ersten Anwendungen ist die FeRAM-Technologie sogar weiter als magnetische Speicherchips: IBM und Infineon haben im Juni 2003 den Prototyp eines MRAM (Magnetic Random Access Memory) vorgestellt, dessen Speicherkapazität mit 128 Kilobit noch sehr klein ist.

»FeRAM-Chip-Prototypen erreichen momentan zwischen 16 und 64 Megabit Speicherkapazität, liegen also noch vier bis zwei Generationen hinter heutigen DRAMs zurück«, erklärt Rainer Waser, Sprecher und Koordinator des gerade gegründeten »Zentrums für Nanoelektronische Systeme in der Informationstechnik« am Forschungszentrum Jülich. Er schätzt, dass FeRAMs in vier bis fünf Jahren zuerst in mobilen Compu- ▷

Ein Bund ungleicher Partner





GRAFIK: K. KERN, MPI FÜR FESTKÖRPERPHYSIK; FOTOGRAFIE: K. NIELSCH, MPI FÜR MIKROSTRUKTURPHYSIK

So lässt sich ein magnetischer Speicher in einem Silizium-Chip realisieren: Die Ausrichtung des Südpols (S) und des Nordpols (N) eines Nickel-Nanostabs (grün) speichert ein Bit an Information (also entweder »0« oder »1«). Die Nanostäbe haben einen Durchmesser zwischen 20 und 50 Nanometern und sind etwa 150 Nanometer hoch. Ihr Abstand beträgt 50 bis 100 Nanometer.

▷ tern arbeiten werden. Mit Blick auf die weiter fortschreitende Miniaturisierung muss die Grundlagenforschung eine entscheidende Frage beantworten: Wie stark dürfen Speicherstrukturen schrumpfen? Bei den Ferroelektrika sucht Rainer Wasers Gruppe nach dieser Grenze. Sie konzentriert sich dabei auf Blei-Zirkonat-Titanat (PZT). FeRAM-Entwickler schätzen diesen Werkstoff, weil er eine starke remanente Polarisation bietet, bei niedrigen Prozesstemperaturen kristallisiert und in dünnen Schichten hergestellt werden kann.

Wärmetod für Informationen

Die Jülicher Forscher bewiesen 2002, dass perfekte PZT-Kristalle auch dann noch eine stabile Polarisation aufweisen, wenn sie nur zwanzig Nanometer Durchmesser haben. Das entspricht einer Kantenlänge von gerade noch fünfzig Atomen. Zum Vergleich: In heutigen DRAMs hat ein Speicherbaustein noch gut einen Mikrometer (millionstel Meter) Durchmesser, ist also fünfzigmal größer. Die winzigen PZT-Nanokristalle kommen der theoretischen Grenze der Ferroelektrizität schon sehr nahe: Unterhalb des so genannten superparaelektrischen Limits stört die thermische Bewegung der Atome den ferroelektrischen Effekt und vernichtet damit jegliche gespeicherte Information.

Die Herstellung kleinster Strukturen schafft ein weiteres Problem: Das ferroelektrische Material lässt sich nur schlecht mit Silizium, dem Standardmaterial der Elektronikchips, »verheiraten«. Bei heutigen FeRAMs ist das noch kein Problem, denn die aufgedampfte Schicht besteht immer noch aus vielen Kristallen, deren gesamte Polarisierbarkeit ausreicht, um zum Beispiel beim Auslesen ein deutliches elektrisches Signal zu geben. Schrumpft eine solche Schicht aber auf Nanodimensionen, gelingt das nur, wenn sie aus einem einzigen, möglichst perfekten Kristall gebildet wird. Andernfalls sind die Dipol-Antennen der vielen winzigen Kristalle nicht parallel ausgerichtet, sondern gegeneinander verdreht, und so heben sich diese Polarisationen zum Teil gegenseitig auf.

Leider ist das Verheiraten der perfekten Kristalle kaum möglich, denn das Kristallgitter des Ferroelektrikums passt nicht auf das von Silizium. Dampft man eine solche Schicht auf, wird der Halbleiterkristall die Anordnung ihrer Atome stark verzerren und die ferroelektrischen Eigenschaften empfindlich stören.

Kornelius Nielsch und seine Kollegen vom Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle entwickelten einen eleganten Lösungsweg mit ferroelektrischem Wismut-Lanthan-Titanoxid (BLT). Sie brachten zwischen den BLT- und den Silizium-Kristall zwei Pufferschichten ein, die insgesamt nur siebzig Nanometer dick sind. Diese bauen die mechanischen Spannungen zwischen den beiden ungleichen Partnern ab und übernehmen zugleich die Funktion einer der Elektroden, die zur Datenspeicherung nötig sind. Nebenbei löst der Puffer ein weiteres Problem: BLT und Silizium reagieren bei direktem Kontakt chemisch miteinander, was das Material ungünstig verändert.

Bits aus Nanostäben

Nicht nur Ferroelektrika interessieren die Hallenser Physiker. Sie entwickeln auch neue magnetische Strukturen, um die Leistung von Festplatten zu steigern. Deren Kapazität wuchs im vergangenen Jahrzehnt durchschnittlich um sechzig Prozent pro Jahr und erreicht heute gut drei Gigabit (Milliarden Bit) pro Quadratzentimeter. Den weiteren Weg zum Terabitspeicher (Tera: tausend Milliarden) versperrt allerdings die Physik: Analog zu den Ferroelektrika droht bei ferromagnetischen Werkstoffen ein superparamagnetisches Limit, bei dem Wärmeenergie der Atome die magnetische Ordnung zerstört.

Eine raffinierte Nano-Architektur kann diesen Effekt verringern, indem sie die magnetischen Bit-Domänen in der Dünnschicht voneinander isoliert, sodass

sie sich nicht gegenseitig stören. Das verbessert die Stabilität gegen thermische Einflüsse. In Kooperation mit Caroline Ross vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelten die Hallenser Forscher zu diesem Ziel eine Bienenwabenstruktur aus hohlen Aluminiumoxid-Säulen, die mit Nickel gefüllt sind (siehe Kasten links). Da die Säulen weichmagnetisch sind, lassen sie sich leicht mit einem Magnetfeldpuls zwischen zwei Zuständen umschalten: Entweder zeigt ihr Nordpol oder ihr Südpol nach oben. So können sie eine digitale Eins oder Null speichern. Solche Nanostäbe sparen schon durch ihre senkrechte Orientierung viel Platz. Die Bit-Domänen heutiger Festplatten liegen dagegen flach nebeneinander.

Die Herstellung solcher Ensembles ist eine technologische Herausforderung. Zum Beispiel sorgt ein trickreich gesteuerter elektrochemischer Prozess dafür, dass sich auf einer Siliziumscheibe (Wafer) eine Wabenstruktur aus Aluminiumoxid selbstorganisiert aufbaut. Jede Wabenzelle enthält eine Pore, deren Größe sich durch die Prozesssteuerung einstellen lässt. Der kleinste erreichte Durchmesser liegt bei zwanzig Nanometern, die Porentiefe kann dank selektiver Ätzprozesse das Fünffache betragen. Schließlich füllt man die Poren mit Nickel.

Träumen ist erlaubt

Den Abstand zwischen zwei Nickelsäulen konnten die Forscher schon auf fünfzig Nanometer verringern. Das entspricht fast fünfzig Gigabit pro Quadratzentimeter. Doch: »Wir untersuchen das ultimative Limit«, charakterisiert Klaus Kern die Forschung seiner Abteilung am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart. Die Stuttgarter Physiker beschäftigen sich zum Beispiel mit der Frage, ob Strukturen möglich sind, in denen nur ein einzelnes magnetisches Atom ein digitales Bit speichert.

Heutige Festplatten brauchen dafür rund 100 000 Atome. Mit einer ausgefeilten Experimentiertechnik gelang es den Forschern, auf einer Kupfer-Oberfläche im Ultrahochvakuum organische Moleküle zur Bildung eines regelmäßigen Musters anzuregen. In jedem Grundelement dieses Musters sitzt ein Eisenatom, und diese »Bits« liegen nur noch etwa einen Nanometer auseinander. Damit würde die Speicherkapazität auf zehn Terabit pro Quadratzentimeter explodieren. Allerdings gelingt es den Physikern noch nicht, die Magnetisierungen dieser Atome einzeln umzuschalten. Das ist unerlässlich, um Informationen zu speichern – und das langfristige Ziel, wie Kern bekräftigt: »Ob das technologisch jemals realisiert werden kann, ist sehr fraglich, aber Träumen ist ja erlaubt.« ◁

Der Physiker **Roland Wengemayr** ist Wissenschaftsjournalist und Redakteur von »Physik in unserer Zeit«.

ULTRAPRÄZISION

Sandstrahler in der Nanowelt

Ionenstrahlen glätten Oberflächen in der optischen Industrie und in der Halbleiterfertigung bis auf wenige Atome große Rauigkeiten.

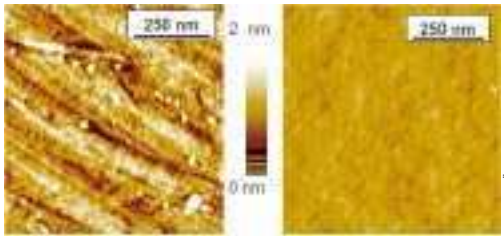
Von Bernd Rauschenbach und Axel Schindler

Strukturen hochintegrierter Schaltkreise werden nicht nur von einer Chip-Generation zur nächsten immer schmaler, sondern auch immer flacher. Nur dann lassen sich auch vertikal zur Oberfläche eines Silizium-Wafers Transistoren und Leitungen bauen oder mehrere Ebenen von Schaltungen übereinander legen. Sollen die Strukturen nur noch wenige Nanometer hoch sein, kommen sie in die Dimension der Rauigkeiten der Wafer-Oberfläche, wie sie Schleifen, Polieren oder chemische Ätzprozesse erreichen können.

Auch die Optiken, mit denen Licht über Masken auf den Wafer projiziert wird, um so die gewünschten Strukturen auf lichtempfindliche Lackschichten abzubilden, müssen immer glattere Oberflächen haben. Jede Rauigkeit größer als wenige Nanometer beugt das Licht und stört somit die Abbildung. Künftige Chip-Generationen werden gar Oberflächenrauigkeiten kleiner als einen Nanometer erfordern, und das auf Flächen bis zu einem Quadratmeter.

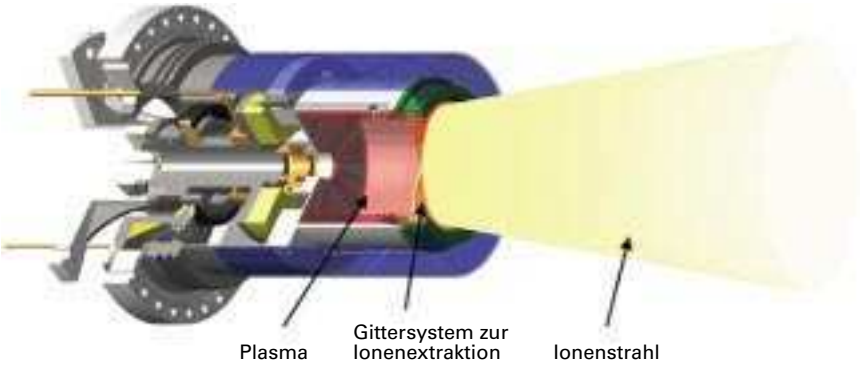
Zudem sollen diese extremen Forderungen auch an gekrümmte Oberflächen gestellt werden. Die Bestrahlung mit energiereichen Ionen scheint eine dafür geeignete Technik zu sein, wie wir in den letzten Jahren gezeigt haben. Dazu haben wir Ionenquellen entwickelt, die sich durch eine hohe Stabilität der Strahlparameter wie Ionenenergie und Ionenstromverteilung, durch lange Standzeiten und geringen Wartungsaufwand auszeichnen. Gemeinsam mit Industriepartnern entstand so die erste Ionenstrahl-Bearbeitungsanlage für den industriellen Einsatz. Die geladenen Teilchen werden durch Einkopplung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen in ein Gas erzeugt. Mit einem Elektrodengitter werden sie extrahiert und eine Ionenoptik – ein System aus Elektroden und Magneten – fokussiert sie zu einem Strahl. Mit einer Energie zwischen 0,1 und 3 Kiloelektronenvolt (keV) erreichen sie gebündelt die Oberfläche des Werkstücks (mit 1 keV erreichen zum Beispiel Argon-Ionen eine Geschwindigkeit von 2500 Kilometern pro Stunde).

Dort stoßen die Ionen mit Atomkernen zusammen und schlagen sie aus ihren Gitterplätzen (andere Effekte dieser elastischen Stöße wie die Ionisation spielen in diesem Zusammenhang keine Rolle). Hinzu kommen Interaktionen der Ionen mit der Elektronenhülle der Oberflächenatome, die den Geschossen Energie rauben. Der Strahl dringt deshalb nicht tiefer als einige zehn bis einige hundert Nanometer ein. Das technologische Vorbild dieses Verfahrens dient der Implantation von Fremdatomen in ein Halbleiter- ▷



UNIVERSITÄT LEIPZIG

Topografie einer amorphen Quarzoberfläche nach mechanischer Politur (links) und ionenstrahlgestützter Glättung (rechts). Das Höhenprofil wurde mittels Rasterkraftmikroskopie bestimmt.



UNIVERSITÄT LEIPZIG, INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE PHYSIK

Über einen Quarzglaszylinder werden hochfrequente Felder in ein Gas eingekoppelt und ionisieren es. Eine Ionenquelle wird daraus, wenn ein Gitter von Elektroden geladene Teilchen aus dem Plasma extrahiert und als Strahl weiterleitet.

gitter. Durch dieses gezielte Dotieren lassen sich dessen elektronischen Eigenschaften sehr genau einstellen (vergleiche auch »Halbleiterdotieren mit Neutronen«, Spektrum der Wissenschaft 9/1999, S. 80). Hier dient es dazu, Material abzutragen. Dieser mikroskopische Zerstäubungseffekt (englisch *sputtering*) wirkt wie ein makroskopischer Ätzprozess oder, stark vereinfacht, wie ein Sandstrahler. Dabei variiert die Ausbeute, also die mittlere Zahl der aus der Oberfläche geschlagenen Atome pro eingeschossenem Ion, extrem mit dem Winkel zwischen der Oberflächennormalen und der Ioneneinfallsrichtung. Bis zu einem Wert von etwa 45 Grad bleibt sie konstant, steigt dann bis zirka 60 Grad an, um danach auf sehr kleine Werte abzufallen – die geladenen Teilchen streifen dann oft nur ihr Ziel.

Der erste Schritt: das Höhenprofil

Diese Regel gilt unabhängig von der Wahl der Ionen. Da der Winkel zwischen den Flanken von Rauigkeiten und dem Strahl zwangsläufig immer sehr spitz sind, werden Erhebungen an der Oberfläche deshalb bevorzugt abgetragen und somit eingeebnet. Häufig lässt sich dieser Effekt durch den Einsatz solcher Ionenspezies noch verstärken, die mit den Oberflächenatomen chemisch reagieren können – zum Energie- und Impulsübertrag gesellt sich noch das chemische Ätzen.

Am Beginn eines solchen Prozesses steht aber die Messung des anfänglichen und das mathematische Design des gewünschten Oberflächenprofils. Es folgt eine Computersimulation des Ätzprozesses, um die optimalen Strahlparameter zu erkunden, denn eine Möglichkeit zur Kontrolle und Korrektur während der Bearbeitung gibt es nicht. Je nach den Anfangsbedingungen und der gewünschten Oberflächenglätte dauert der Prozess Minuten bis Stunden.

Die Ausgangstopografie der im Allgemeinen mechanisch hochpolierten Oberfläche wird beispielsweise mittels Rasterkraftmikroskopie bestimmt. Dabei tastet eine sehr feine Spitze, der Nadel eines Plattenspielers vergleichbar, die Oberfläche ab. Je nach dem lokalen Abstand des Sensors erfährt dessen »Arm« unterschiedlich starke Auslenkungen. Allerdings sind mit diesem Verfahren nur Bereiche einer Kantenlänge bis etwa zehn Mikrometer zu vermessen.

Der Trend geht daher zur interferometrischen Messung: Ein Laserstrahl wird geteilt; während der eine Teilstrahl als Referenz dient, reflektiert die zu untersuchenden Oberfläche den anderen. Führt man beide wieder zusammen, unterscheiden sich ihre Phasen entsprechend dem zu messenden Höhenprofil – statt im Gleichklang zu schwingen, überlagern sich Wellenberge und -täler zu einem Interferenzmuster. Auf diese Weise lassen sich schon Flächen von einigen Quadratzentimetern untersuchen. Um noch größere Bereiche zu erfassen, werden einzelne Interferogramme quasi aneinander montiert; man spricht von Stitching Interferometrie.

Das so gewonnene Ausgangsprofil wird in der Simulation mit verschiedenen Strahlparametern bearbeitet, bis die gewünschte Endtopografie optimal erreicht ist. Die entsprechenden Daten nutzt ein Computer zur Steuerung des realen Prozesses. Es gibt nur wenige Gruppen weltweit, die bislang das Ionensputtern zur Glättung einsetzen. Meist dient die Verweildauer im Strahl zur Steuerung, es besteht aber auch die Möglichkeit, die zugeführte Energie durch Blenden oder ein Lochmuster zu variieren. Im ersten Fall verwendet man einen Ionenstrahl von wenigen Mikrometern Durchmesser. Seine Intensität fällt vom Zentrum, einer Gaußkurve folgend, rotationssymmetrisch nach außen hin ab. Prinzipiell kann entweder die Ionenquelle oder das Werkstück bewegt werden.

Für die beiden letztgenannten Varianten ist eine Breitstrahlionenquelle erforderlich, deren Strahl einige Zentimeter bis Dezimeter breit ist. Der auf die Oberfläche gelangende Strahlanteil lässt sich dann durch feststehende oder computergesteuerte Blenden verändern oder durch eine Metallfolien-Lochmaske mit ortsabhängiger Transparenz einstellen. Zwar erübrigt sich damit jegliche Relativbewegung zwischen Werkstück und Strahl, doch für jede Topografie muss eine eigene Metallfolie angefertigt werden, und das ist sehr aufwendig.

Vorher – nachher

Um das Potenzial dieser Technik auszuloten, haben wir ein 8 mal 15 Quadratzentimeter großes, konkaves Keramik-Spiegelsubstrat für die Lithografie geglättet. Die Rauigkeit der zuvor konventionell polierten Oberfläche wurde nach drei iterativen Ionenstrahl-Bearbeitungsschritten etwa um das Vierzigfache verbessert: Die mittlere Rauigkeit sank von 315,5 auf 6,9 Nanometer, der Abstand zwischen »Tälern« und »Höhen« von 69,1 auf 0,9 Nanometer. Eine zweite Demonstration gelang mit der Bearbeitung einer Quarzglasfläche mit einem Durchmesser von etwa 15 Zentimetern (siehe Bild Seite 81). Nach konventioneller Politur betrug die mittlere Rauigkeit immerhin nur 3,9 Nanometer, doch mit dem Ionenstrahl wurden 0,7 Nanometer erreicht, ein Wert in der Größenordnung des Atomdurchmessers. Wenn dereinst die Grenze der Miniaturisierung von Halbleiterchips erreicht sein sollte, wird es wohl nicht daran liegen, dass Wafer oder Spiegel nicht glatt genug sind.

Der Physiker **Bernd Rauschenbach** leitet das Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung in Leipzig, **Axel Schindler** ist dort wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter.

Spiegel aus Nanoschichten

Chiphersteller setzen auf extrem kurzwelliges Ultaviolettlicht (EUV), um ihre Produkte weiter zu verkleinern. Diese Strahlung lässt sich aber nur noch mit spiegelnden Schichten fokussieren.

Von Bernd Müller

Wie überträgt man das Layout eines Mikrochips auf den Halbleiterrohling, den so genannten Wafer, wenn die Transistoren und Leiterbahnen nur noch hundert Nanometer oder kleiner sind? Normalerweise werden dazu Masken – gewissermaßen die »Diavorlagen« mit den Abbildern der Transistoren und Leiterbahnen – auf die Siliziumscheibe projiziert, doch Beugung an deren Kanten begrenzt eine solche Abbildung: Die Auflösung kann nicht kleiner als die Wellenlänge des verwendeten Lichts sein, Strukturen, die näher beieinander liegen, werden nicht mehr getrennt abgebildet.

Noch vor wenigen Jahren sahen namhafte Chiphersteller die Lösung in der Röntgenlithografie mit ihren kürzeren Wellenlängen. Doch die dafür erforderlichen Masken erwiesen sich als zu teuer und zu wenig stabil, die Investitionskosten der Belichtungsmaschinen (fachlich »Stepper«) als zu hoch. Inzwischen hat sich die so genannte Phasenlithografie in Verbindung mit ultraviolettem Licht von 193 Nanometer Wellenlänge durchgesetzt. Als würde ein Maler mit einem dicken Pinsel einen feinen Strich ziehen, lassen sich mit diesem Verfahren Chipstrukturen von neunzig Nanometer Breite fertigen; die Maske wird dabei über ein viele Zentner schweres Objektiv im Maßstab 4:1 verkleinert. Das Verfahren beruht auf einem raffinierten Trick: Auf der Maske werden zusätzliche Strukturen angelegt, an denen das Licht so gebeugt wird, dass es mit der Projektion von Kanten interferiert. Im Endeffekt wird deren Beugung zwar nicht verhindert, aber durch diese zusätzliche Maßnahme der Kontrast an den sonst unscharfen Bildern der Kanten verstärkt.

Neue Optiken für neue Wellenlängen

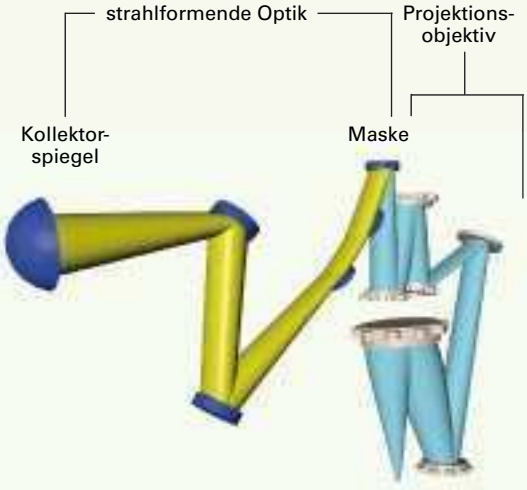
Doch um die Leistung von Mikrochips auch im nächsten Jahrzehnt in gewohntem Tempo zu steigern, peilen die Hersteller 35-Nanometer-Breiten an. Wieder lautet die Devise: kürzere Wellenlängen. Spätestens zum Ende dieses Jahrzehnts sollen Belichtungsmaschinen mit extremem UV-Licht von 13,5 Nanometer Wellenlänge arbeiten. Der »Pinsel« ist damit fein genug und der Umweg über die teuren Phasenschieber-Masken entfällt. Auch bei der EUV-Lithografie wird voraussichtlich im Maßstab 4:1 abgebildet, weil der sich in diesem Bereich als Industriestandard durchgesetzt hat.

»Damit können wir bis an die Grenzen der klassischen Mikroelektronik vorstoßen«, glaubt Oliver Wolf, Leiter Technologie Beschichtung bei der Carl Zeiss SMT AG in Oberkochen. Doch während bei klassischen Wafersteppern das Licht durch Linsen von der Größe einer Tortenplatte fällt, muss man bei extremem UV-Licht mit Spiegeln arbeiten. »Unter 150 Nanometer Wellenlänge gibt es nämlich keine transparenten Materialien mehr«, erklärt Peter Kürz, bei Zeiss für die Entwicklung der geeigneten Lithografiemaschinen verantwortlich. Der Strahlengang des Lichts ist dann aber viel komplizierter als bei einem Linsenobjektiv und gleicht einem Zickzackkurs, weil sich die sechs oder mehr Spiegel nicht im Weg stehen dürfen (siehe Grafik unten). Außerdem müssen die Substrate, auf denen die Schichten aufgedampft werden, asphärisch geschliffen werden, damit sie das Lichtbündel fokussieren und die Maske verkleinert abbilden.

Bis vor wenigen Jahren gab es allerdings keine Spiegel, die genügend nutzbares Licht reflektieren. Wichtige Impulse lieferte die nationale EUV-Initiative, an der Carl Zeiss und mehrere Forschungsinstitute beteiligt sind, darunter ▷

Komplexer Strahlengang

In aktuellen Wafer-Belichtern bündeln Linsensysteme die Strahlen.



Spiegel lenken das Licht bei EUV-Steppern.

Beim Übergang zur Lithografie mit extremem Ultraviolettlicht (EUV) heißt es Abschied nehmen von Linsen, denn unterhalb von 150 Nanometern gibt es keine geeigneten transparenten Materialien mehr. Stattdessen kommen Spiegel zum Einsatz, die durch streifenden Einfall Strahlen bündeln. Das beginnt beim Kollektor, der Licht der Plasmaquelle über Spiegelröhren sammelt, und endet bei dem aus sechs Spiegeln bestehenden Objektiv für die Abbildung der Maske.

LINKS: ZEISS; RECHTS: ZEISS/THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

▷ auch der Lehrstuhl für Molekül- und Oberflächenphysik an der Universität Bielefeld. Dort entwickelt Ulrich Heinzmann seit 15 Jahren Spiegel, die aus Dutzenden von Schichten – so genannten Multilayern – bestehen. Die ultradünnen Lagen reflektieren das Licht nach dem Bragg-Prinzip: Wenn es unter einem bestimmten Winkel auf die Schichten trifft, schwingen die Lichtwellen hinter dem Spiegel in Phase und verstärken sich. Je nach Abstand der Ebenen wird aber nur eine genau definierte Wellenlänge durchgelassen – der Spiegel blockiert also gleichzeitig unerwünschte Lichtanteile. Das zwanzigköpfige Team in Bielefeld stellt Spiegel für Wellenlängen von drei bis zwanzig Nanometer her.

Nahe am theoretischen Limit

Die Fertigung erfolgt mittlerweile automatisch und mit sehr hoher Präzision. Im Ultrahochvakuum wird Schicht für Schicht aufgedampft. Immer zwei Lagen aus verschiedenem Material bilden ein Paar, dessen Dicke einer halben Lichtwellenlänge entspricht, zum Beispiel 2,8 beziehungsweise 4,2 Nanometer bei Molybdän-Silizium, das bei 13,5 Nanometer Wellenlänge zum Einsatz kommt. Weitere Materialpaarungen sind Wolfram-Silizium und Titan-Kohlenstoff. Die Rauigkeit einer solchen Lage darf dabei 0,1 Nanometer – die Größe eines Atoms – nicht überschreiten, jede neue Schicht wird deshalb mit Ionenstrahlen poliert (siehe Beitrag Seite 81).

Wenn die Spiegel Heinzmanns Labor verlassen, bestehen sie aus bis zu hundert Einzelschichten, die zusammen nahezu 70 Prozent des eingestrahlten Lichts reflektieren – theoretisch sind bis zu 74 Prozent möglich. Die restlichen 30 Prozent der Lichtenergie heizen das Substrat immer noch so stark auf, dass nur Trägermaterialien mit geringer thermischer Ausdehnung wie das Material Cerodur der Firma Schott in Frage kommen.

In Oberkochen, wo Zeiss ebenfalls mit der Beschichtung von Spiegeln begonnen hat, soll die Fertigung beschleunigt und automatisiert werden. Noch dauert das Beschichten eines Spiegels einen ganzen Tag – eine Nacht zum Erzeugen des Ultrahochvakuums von 10^{-9} Millibar und etwa sechs Stunden fürs Beschichten. Doch Qualität geht vor Schnelligkeit – Fehler bei der Herstellung wären verheerend, weil dann auch das Trägersubstrat ruiniert wäre. Die Platten müssen aufwendig geschliffen und poliert werden, bevor sie zum Beschichten gehen. Würde man die Fläche eines zehn Zentimeter großen Substrats auf die Fläche Deutschlands ausdehnen, dürfte die höchste Erhebung nur zwei Millimeter betragen. Wenn die Geräte in Serie gehen, werden die Spiegel fünfzig Zentimeter Durchmesser haben.

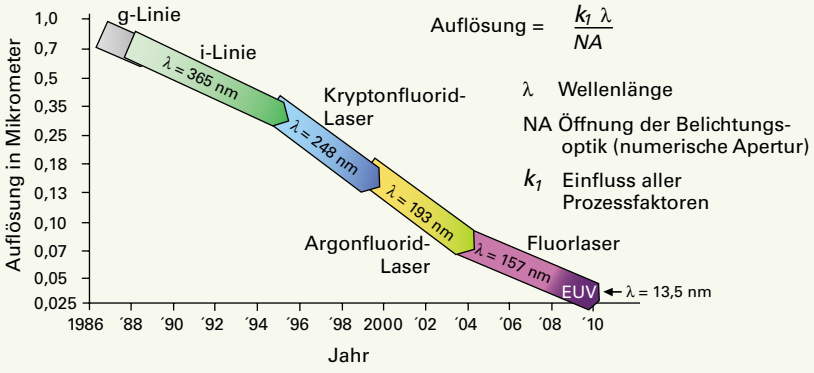
»Wir liegen bei der EUV-Lithografie eine Nasenspitze vor Japan«, sagt Oliver Wolf stolz. Die holländische ASML, an die Zeiss seine Optiken für Waferstepper liefert, hält einen Marktanteil von über fünfzig Prozent, deutlich vor den beiden Konkurrenten Nikon und Canon. Wolf lobt neben der guten Förderpolitik des Bundes für eine »Technologie mit Weltbedeutung« vor allem die gute Zusammenarbeit mit den Forschungsinstituten. Partner von Zeiss bei der Beschichtungstechnologie ist neben dem Bielefelder Team von Ulrich Heinzmann das FOM-Institut für Plasmaphysik in Rijnhuizen, Holland, und das Radiometrielabor der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB).

Auch mehrere Fraunhofer-Institute sind mit von der Partie, unter anderem das Institut für Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden. Das IWS erprobt gerade das einzige produktionstaugliche Reflektometer für 13,5 Nanometer Wellenlänge in Europa, mit dem die Reflektivität der Schichten nach jedem Beschichtungsvorgang vermessen wird. Ein grüner Laserstrahl erzeugt aus Goldatomen ein Plasma, das EUV-Strahlung aussendet. Je nach Präzision reflektiert eine Schicht dieses Licht unterschiedlich gut. Die Kunst ist, das Bedampfen zu stoppen, bevor die Schicht zu dick wird.

Zusammen mit dem amerikanischen Lawrence Livermore National Laboratory hat das Zeiss-Team einen EUV-Belichter mit zwei Spiegeln erfolgreich getestet. Bis 2005 will man Chipherstellern Prototypen mit zehn Spiegeln zur Verfügung stellen, damit diese weitere Komponenten des Herstellungsprozesses entwickeln können. Noch vor 2010 sollen die EUV-Belichter in Serie gehen. ◁

Bernd Müller ist Physiker und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Esslingen.

Höhere Auflösung, kürzere Wellenlänge



ZEISS / THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Laut dem Moore'schen Gesetz soll sich die Zahl der Transistoren auf einem Chip etwa alle 18 Monate verdoppeln. Noch in den 1990er Jahren reichten einzelne Spektrallinien von Quecksilberdampflampen zur Masken-Belichtung, mittlerweile stößt selbst der Argonfluorid-Laser an Grenzen, die durch Tricks wie Phasenschiebermasken erweitert werden. Ab dem nächsten Jahr sollen Fluorlaser helfen, doch spätestens 2007 müssen Quellen und Optiken für extremes Ultraviolettlicht (EUV) kommerziell verfügbar sein.

MEDIZIN

Bessere Früherkennung von Brustkrebs

Die Magnetresonanz-Tomografie erlaubt eine zuverlässigere Erkennung von Tumoren in der weiblichen Brust – speziell bei Frauen, die auf Grund einer familiären Vorbelastung durch Gendefekte mit einem höheren Brustkrebsrisiko zu rechnen haben.

Von Olivia Meyer

Die Früherkennung von Brustkrebs stellt gerade bei jungen Frauen, die familiär vorbelastet sind und dadurch ein höheres Erkrankungsrisiko tragen, immer noch ein ernsthaftes Problem dar – unter anderem, weil die derzeit etablierte Röntgen-Mammografie für diese Personengruppe offenbar nicht sensitiv genug ist. Dies könnte sich nach Ansicht der Radiologin und Privatdozentin Christiane Kuhl von der Universitätsklinik Bonn mithilfe der Magnetresonanz-Tomografie (MRT, auch Kernspin-Tomografie genannt) ändern.

Bereits vor einigen Jahren haben Forscher der Bonner Universitätsklinik die Eignung der MRT für die Früherkennung des familiären, erblich bedingten Mammakarzinoms untersucht. Die Ergebnisse dieser Pionierarbeit ermutigten andere Gruppen weltweit, eigene Studien zu beginnen. Untersuchungen in den USA und den Niederlanden bestätigten, dass die MRT tatsächlich die empfindlichste Methode ist, um Brustkrebs bei jungen »Hochrisiko-Frauen« zu entdecken. Allerdings hatte die MRT in diesen Studien nur einen ziemlich niedrigen »positiven Prädiktivwert«. Diese Zahl gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass bei einer Patientin tatsächlich Brustkrebs vorliegt, wenn die Untersuchung einen auffälligen Befund ergeben hat.

Aufsehen erregten daher die Ergebnisse einer umfangreichen Studie zur MRT-Früherkennung des familiären Mammakarzinoms, die Christiane Kuhl im Juni 2003 auf einem Treffen der American Society of Clinical Oncology in Chicago vorstellte. Die Radiologin hatte über fünf Jahre – von 1996 bis 2001 – an der Bonner Klinik 462 »Risikofrauen« einmal jährlich sowohl mit der Röntgen-Mammografie, dem Ultraschall als auch mit der Magnetresonanz-Tomografie auf Brustkrebs untersucht. Aufgenommen in die Studie wurden Patientinnen, die entweder als Trägerin defekter BRCA1- beziehungsweise BRCA2-Gene identifiziert worden waren oder die auf Grund ihrer eigenen oder der familiären Krankheitsgeschichte als Trägerin eines mutierten Tumor-Suppressor-Gens »verdächtigt« wurden. Tumor-Suppressor-Gene sind – vereinfacht ausgedrückt – dafür zuständig, Mutationen, die zum Beispiel durch ionisierende Strahlen entstanden sind, zu korrigieren und damit der Entwicklung von Karzinomen vorzubeugen.

Der Studie zufolge erreichte die MRT verglichen mit der Röntgen-Mammografie und der Sonografie nicht nur die höchste Sensitivität (das heißt, es wurden konkret mehr als doppelt so viele Karzinome gefunden wie mit Mammografie und Ultraschall zusammen), sondern hatte mit 57 Prozent auch einen doppelt so hohen positiven Prädiktivwert wie die Mammografie. In einem Gespräch mit »Spektrum der Wissenschaft« erläutert Christiane Kuhl, warum die MRT für junge Risikopatientinnen das Mittel der Wahl ist.

CHRISTIANE KUHL

Die Radiologin Christiane Kuhl forscht und lehrt in Bonn.

Spektrum der Wissenschaft: In Deutschland erkranken rund 46 000 Frauen jährlich an Brustkrebs, bei einem Drittel verläuft die Erkrankung tödlich. Hängt die Prognose auch davon ab, ob es sich dabei um familiären, also erblich bedingten, oder um sporadischen Brustkrebs handelt?

Christiane Kuhl: Grundsätzlich ja, denn Ursachen, radiologisches Aussehen und klinischer Verlauf sind verschieden. Die körpereigene Krebs-Abwehr verfügt über »Tumor-Suppressor-Gene«, die schädliche Mutationen korrigieren. Wenn ein solches Suppressor-Gen selbst durch eine Mutation funktionsunfähig wird, kann eine Korrektur nicht mehr erfolgen, und die mutierte Zelle kann sich im schlimmsten Fall zu einem Karzinom weiterentwickeln. Jede achte Frau ist im Laufe ihres Lebens von einem solchen sporadischen Mammakarzinom betroffen.

Von einem familiären Mammakarzinom, das etwa zehn Prozent aller Brustkrebsfälle ausmacht, spricht man dann, wenn die Frauen bereits eine defekte Kopie eines Tumor-Suppressor-Gens ererbt haben. Diese Frauen haben ein Risiko von achtzig Prozent, an Brustkrebs zu erkranken. Das familiäre Mammakarzinom tritt daher deutlich eher auf als das sporadische, oft im Alter zwischen dreißig und vierzig; mehr als die Hälfte der Frauen erkrankt vor dem fünfzigsten Lebensjahr.

Spektrum: Die Vorsorge muss also bei diesen Frauen sehr früh beginnen?

Kuhl: Ja, und zwar viel früher als bei Frauen ohne besondere familiäre Belastung: in einem Alter von etwa dreißig Jahren. Und wir müssen das Screening-Verfahren der oft erhöhten Wachstumsgeschwindigkeit des Tumors anpassen, also in kurzen Zeitabständen kontrollieren.

Bislang wurde hierfür die Röntgen-Mammografie eingesetzt – allerdings mit sehr bescheidenen Resultaten, was auch durch unsere Studie bestätigt wurde. Denn das Drüsengewebe junger, dreißig- bis vierzigjähriger Frauen ist in der Regel noch voll entwickelt und sehr dicht. Wenn nun ein Tumor im dichten Drüsengewebe eingebettet ist, können wir ihn mit der Röntgen-Mammografie oft nicht erkennen. Mit zunehmendem Alter bildet sich das Drüsengewebe zurück und wird durch Fettgewebe ersetzt. Das ist bei Frauen um die fünfzig, die üblicherweise zur Mammografie kommen, meistens bereits der Fall.

Spektrum: Wo liegt denn dann der Vorteil der Röntgen-Mammografie?

Kuhl: Einige Mammakarzinome und deren Vorstufen prägen manchmal kleinste Kalkpartikel aus. Über diese Mikroverkalkungen sind die Karzinome auch im Röntgenbild indirekt zu erkennen, selbst wenn sie in dichtem Drüsengewebe liegen. Das ist ein spezifischer Vorteil der Röntgen-Mammografie, denn weder die MRT noch Ultraschall vermögen Mikroverkalkungen nachzuweisen. Allerdings relativiert sich dieser Vorteil bei Frauen mit familiärem Mammakarzinom sehr, denn diese Erkrankungen prägen offenbar weit seltener Mikroverkalkungen aus als sporadische Mammakarzinome.

Spektrum: Für die Patientinnen ist auch die Strahlenbelastung ein Thema …

Kuhl: Natürlich. Da das Röntgen-Screening bereits im Alter von dreißig Jahren beginnt, erhalten gerade jene Frauen, die auf Grund eines Gendefekts Strahlenschäden nicht korrigieren können, durch die ionisierende Röntgenstrahlung eine deutlich höhere kumulative Lebenszeit-Dosis als die mutmaßlich »genetisch intakten« Frauen. Eine solche Zusatzbelastung sollte aber tunlichst vermieden werden – etwa durch Einsatz der MRT, die ohne Röntgenstrahlung auskommt.

Spektrum: Ziel Ihrer Studie war es also, für junge Frauen mit familiärem Mammakarzinom das geeignetste Screening-Verfahren zu finden?

Kuhl: Wir hielten es für notwendig, Röntgen-Mammografie, Ultraschall und Magnetresonanz-Tomografie parallel zur Früherkennung des familiären Mammakarzinoms einzusetzen, um zu klären, welche Methode die beste und sicherste Diagnose liefert. Denn was man bisher über die »ererbte« Form des Brustkrebses weiß, zeigt, wie wichtig eine zuverlässige Früherkennung ist.

Spektrum: Können Sie das noch näher erläutern?

Kuhl: Nachdem Mitte der 1990er Jahre zwei der wichtigsten Tumor-Supressor-Gene namens BRCA1 und BRCA2 identifiziert worden waren, konnte man erstmals darangehen, Frauen auf einen Gendefekt zu testen, der möglicherweise für Brustkrebs verantwortlich ist. Die Deutsche Krebshilfe hat daraufhin eine Multicenter-Studie ins Leben gerufen, deren Hauptzweck es zunächst war, diese Genmutationen zu erforschen und die betroffenen Frauen zu beraten.

Wir waren hier in Bonn der Meinung, dass wir den Frauen weiterführende Hilfe anbieten müssen. Denn die Genmutation an sich kann derzeit ja nicht therapiert werden – mithin bleibt die Früherkennung unverzichtbar. Selbst dann, wenn der gesamte Brustdrüsenkörper prophylaktisch entfernt wird, was zum Beispiel in den USA Frauen mit dokumentierter Genmutation angeboten wird, bleibt ein Restrisiko bestehen.

AG. FOCUS / SPL, MAURO FERMARIELLO

Die Untersuchung in einem Magnetresonanz-Tomografen – hier in einer offenen Ausführung – bietet eine hohe Befundsicherheit bei der Diagnose von Brustkrebs. Zudem belastet sie die Patientinnen nicht durch ionisierende Strahlung.

Spektrum: Und wenn der Gentest keine Mutation ergeben hat? Können die Frauen sich dann sicher fühlen?

Kuhl: Der Gentest ist leider nur begrenzt tauglich, um Frauen, die sich ausweislich ihrer Eigen- oder Familienanamnese in einer »Hochrisiko-Situation« befinden, von ihrer Angst zu befreien. Die bislang bekannten BRCA-Mutationen sind nach derzeitigem Kenntnisstand nur für die Hälfte aller familiär bedingten Mammakarzinome verantwortlich. Auch bei einem negativen Testergebnis dürfen diese Frauen also nicht aus der intensivierten Früherkennung entlassen werden.

Spektrum: Welche Ergebnisse hat nun Ihre Studie erbracht?

Kuhl: Bereits unsere ersten Resultate haben die Überlegenheit der MRT überaus deutlich gezeigt. Wir hatten mit diesem Verfahren doppelt so viele Karzinome gefunden wie mit der Röntgen-Mammografie und nur halb so viele falsche positive Befunde. Das hat uns dazu ermutigt, die Studie fortzuführen.

Spektrum: Worauf beruht die hohe Empfindlichkeit der Magnetresonanz-Tomografie?

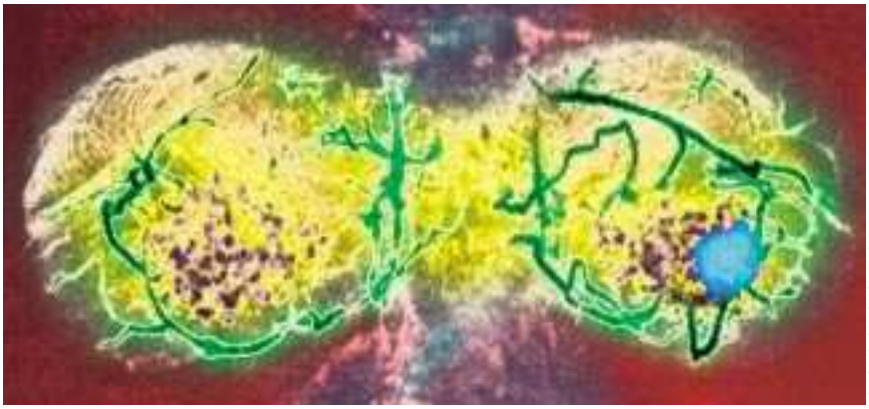
Kuhl: Wir verwenden grundsätzlich ein Kontrastmittel, eine sehr verträgliche Gadoliniumverbindung. Das Kontrastmittel verteilt sich im Blutstrom und reichert sich dort an, wo die Durchblutung verstärkt ist. Das Wachstum von bösartigen Tumoren geht mit der Ausbildung zusätzlicher Blutgefäße einher, deren Wände undicht und löchrig sind. Diese pathologischen Veränderungen im Tumor werden durch die MRT sichtbar.

Spektrum: Sie beurteilen nicht nur ein verdächtiges Aussehen, sondern auch eine verdächtige Kinetik der Kontrastmittelanreicherung.

Kuhl: Ja. Gutartige Veränderungen sind normalerweise durch glatte Ränder charakterisiert. Bösartige Tumoren hingegen wuchern in das umgebende Gewebe hinein und weisen deshalb keine scharfen Ränder auf. Eine solche Unterscheidung ist bereits mit Ultraschall und Röntgen-Mammografie möglich, funktioniert bei der MRT aber noch besser. Und Sie haben eine zusätzliche Information: Sie sehen, wie schnell sich das Kontrastmittel anreichert. Zu einem bösartigen Tumor gelangt das Kontrastmittel sehr schnell.

Spektrum: Warum beurteilen viele Ärzte eine MRT-Untersuchung der Brust immer noch recht kritisch?

Kuhl: Das Kontrastmittel reichert sich überall dort an, wo die Zellvermehrung verstärkt ist. Deshalb ist es manchmal schwierig, den Wald vor lauter Bäumen noch zu erkennen. Anders als bei Mammografie und Ultraschall ist bei der MRT die eigentliche Detektion absolut unproblematisch. Die Kunst ist eher die Klassifizierung der Befunde in gutartig oder ▷



AG. FOCUS / SPL, SIMON FRASER

In dieser MRT-Aufnahme der Brüste einer 53-jährigen Patientin zeichnet sich ein Tumor ab (blau). Das Kontrastmittel lässt Blutgefäße als grüne Linien und schwarze Punkte erscheinen.

▷ bösartig. Man muss viele Fälle gesehen haben, um eine hohe Sicherheit der MRT-Befunde zu erreichen und unnötige Operationen zu vermeiden.

Spektrum: Verwenden denn die anderen Forschungsgruppen, welche die Eignung der MRT für die Brustkrebsdiagnostik untersuchen, die gleichen Kriterien für die Beurteilung?

Kuhl: Grundsätzlich machen wir nichts anderes als unsere Kollegen. Aber für die MRT gilt genauso wie für die Röntgen-Mammografie, dass die Qualität der Befunde mit der Erfahrung des Untersuchers wächst. Wir sehen hier seit über zehn Jahren jährlich rund 2000 MRTs der Brust. Damit sind wir schon allein hinsichtlich dieser Zahl eines der international stärksten Zentren.

Spektrum: Ihre Studie ist nun abgeschlossen. Wie geht es weiter?

Kuhl: Die Ergebnisse unserer Bonner Studie sind nicht ohne weiteres übertragbar, schon deshalb nicht, weil wir hier auf Grund der hohen Patientenzahlen eine besonders hohe Befundsicherheit anbieten können. Seit 2002 finanziert die Deutsche Krebshilfe eine so genannte Multicenter-Studie, die bis mindestens 2005 laufen wird. Dabei wird das Abschneiden der verschiedenen Verfahren an mehreren Standorten miteinander verglichen. An dieser Studie, die rund tausend Patientinnen erfasst, nehmen außer unserer Klinik noch die Universitätskliniken Großhadern, Ulm und Münster teil.

Spektrum: Wie sieht die Situation für Frauen aus, die nicht an der Studie teilnehmen: Übernehmen die gesetzlichen Krankenkassen die Kosten für die MRT?

Kuhl: Bei strenger Indikation mittlerweile ja. Aber es ist immer noch viel einfacher, für jedes andere Organ eine MRT auf Krankenschein zu bekommen als für die Brust – obwohl sich gerade hier das Verfahren als äußerst effizient herausgestellt hat. Mit der MRT erreichen Sie nicht nur eine hohe Sensitivität bei der Diagnostik des familiären, sondern auch bei derjenigen des sporadischen Mammakarzinoms der nicht erblich belasteten Frau. Speziell für die Therapieplanung liefert sie wichtige Hinweise: Frauen, bei denen per Röntgen-Mammografie oder Ultraschall ein Karzinom nachgewiesen wurde, sollten sich vor einer brusterhaltenden Operation noch einer MRT unterziehen. Das wird bisher viel zu selten gemacht. Denn bei bis zu zwanzig Prozent der Frauen mit vermeintlich einzelnem Herd finden Sie mit der MRT weitere Tumoren in derselben oder in der gegenseitigen Brust. Diese sollten natürlich ebenfalls bei der Operation entfernt werden! Auch kleinste Rezidivherde der bereits operierten Brust werden mit der MRT gefunden und können unproblematisch von Narben unterschieden werden, was mit Mammografie und Sonografie grundsätzlich nicht möglich ist.

Spektrum: Für die junge »Risikofrau« ist also die MRT das Mittel der Wahl für die Früherkennung. Welche Empfehlung geben Sie der »Normalfrau«?

Kuhl: Auch Frauen ohne familiäre Vorbelastung haben ein Risiko von zwölf Prozent, an sporadischem Brustkrebs zu erkranken. Die Röntgen-Mammografie ist für diese Frauen sicherlich nach wie vor die Basis für eine Früherkennung und sollte vom vierzigsten Lebensjahr an einmal jährlich durchgeführt werden.

Wir nehmen aber an, dass die MRT auch hinsichtlich der Früherkennung des sporadischen Mammakarzinoms der Mammografie und dem Ultraschall überlegen ist. Doch gibt es bislang noch keine aussagefähigen Studien zu dieser Patientinnengruppe. Wir würden eine solche Studie gerne durchführen, aber es ist in Deutschland außerordentlich schwierig, für solche klinischen Studien Drittmittelgeber zu finden – speziell, da hier, im Gegensatz zu den von der pharmazeutischen Industrie unterstützten Medikamentenstudien, kein Sponsor die fehlende staatliche Förderung ausgleicht.

Olivia Meyer ist promovierte Physikerin und freie Wissenschaftsjournalistin in Ratingen.

FICTION

Matrix Reloaded – Leben wir in einer Simulation?

Sind wir nur programmierte Scheinwesen innerhalb eines riesigen Computerprogramms? Dann müsste es auch Programmierfehler geben, und wir müssten im Prinzip fähig sein, sie zu entdecken.

Von Christoph Pöppe

Woher wissen wir eigentlich, dass die Welt, in der wir leben, echt ist? Science-Fiction-Autoren haben vielfach die Möglichkeit durchgespielt, wir selbst samt allem, was wir wahrnehmen, seien nur Illusion. In Wirklichkeit sei der Lauf der Welt nichts weiter als der Ablauf eines gigantischen Computerprogramms.

Manche Untereinheiten des Programms werden durch den Programmablauf erst geschrieben. Einige von ihnen entwickeln vielleicht sogar Bewusstsein,

genauer: Sie produzieren Output, den ihresgleichen ebenso wie der externe Beobachter ohne weiteres als Äußerung von Bewusstsein akzeptieren. Wer durch Filme wie »Matrix« oder den Klassiker »Welt am Draht« noch nicht überzeugt ist, den belehrt die moderne Kognitionsphilosophie, dass die Hypothese, in einem »seelenlosen« Computer könne so etwas wie Bewusstsein entstehen, nicht zu fundamentalen Widersprüchen führt.

Na gut: Unterstellen wir also, unser Universum samt allem, was darinnen ist, sei von intelligenten Wesen programmiert oder, was dasselbe ist, physikalisch in Gang gesetzt worden; nennen wir sie aus nahe liegenden Gründen die »Götter«. Gibt es irgendeine Möglichkeit, diese Annahme zu bestätigen oder zu widerlegen?

Eine erste Folgerung ist: Die Götter müssen über ungeheuer viel Zeit und Energie verfügen. Sie können es sich leisten, einen kompletten Urknall und damit einen Prozess auszulösen, in dessen Verlauf Sterne zu Milliarden entstehen und vergehen, unter entsprechendem Energieumsatz; und Milliarden Jahre sind für sie wie ein Tag. Denn der ganze Programmieraufwand würde sich für sie nicht lohnen, wenn sie unsere Universums-Simulation nicht in überschaubarer Zeit ablaufen lassen könnten. Wir sind die Bakterien in einem gigantischen Labor; also müssen die Leute, die uns in die Petrischalen gesetzt haben, um Größenordnungen langsamlebiger sein als wir. Nachdem sie unsere Welt bis zu ihrem natürlichen Ende beobachtet oder vorzeitig abgebrochen haben, setzen die Götter ein neues Experiment an, mit leicht veränderten Anfangsbedingungen. Wer weiß – wenn die Lichtgeschwindigkeit doppelt so hoch ist wie bei uns, kommen dabei vielleicht nicht bloß Menschen heraus, sondern eine uns weit überlegene Zivilisation mit technischen Möglichkeiten, die denen der Götter etwas näher kommen.

Damit hätten wir eine einleuchtende Erklärung für einen seltsamen Befund: Fundamentale Naturkonstanten wie Lichtgeschwindigkeit, Planck'sches Wirkungsquantum und Feinstrukturkonstante haben genau die Werte, die unserer Existenz zuträglich sind. Ein paar Promille Abweichung, und die Welt wäre ein gleichmäßig verteilter Staub oder ein einziger Materieklumpen, jedenfalls viel langweiliger als die Welt, die wir kennen. Also sollten wir uns nicht wundern, wenn wir die richtigen Werte für die Naturkonstanten beobachten: Es geht gar nicht anders, denn sonst gäbe es uns nicht.

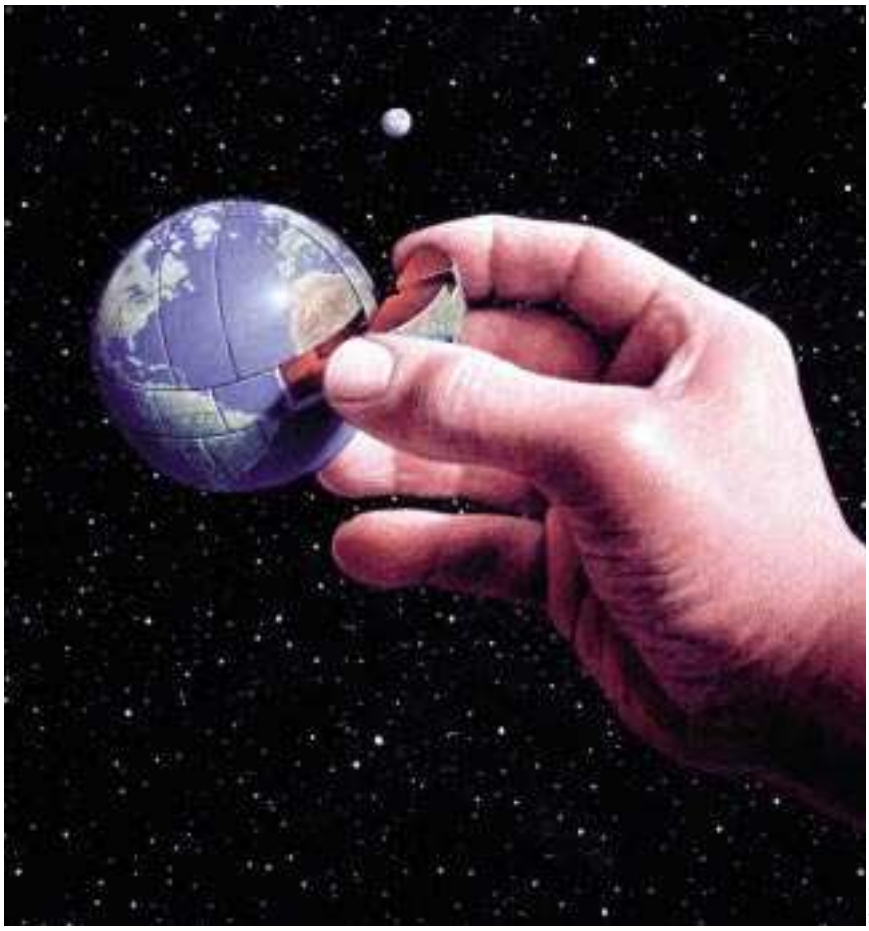
Das ist das »schwache anthropische Prinzip« – unwiderlegbar, aber unbefriedigend, denn es gibt keine einleuchtende Antwort auf die Frage, warum es uns überhaupt gibt. Jetzt wissen wir es: Die Götter wollen ein interessantes Programm sehen! Also wählen sie den Input für ihr Programm – die Naturkonstanten – so, dass wenigstens ab und zu eine Supernova oder ein kollabierendes Schwarzes Loch für Abwechslung sorgen und – mit etwas Glück – ein paar Bestandteile des simulierten Universums auf die Idee kommen, selber ein Universum zu simulieren.

Spinnen wir den Gedanken weiter: Die Welt ist ein gigantischer Big-Brother-Container und die Götter beobachten feixend unser Treiben durch eine Zeitlupe. Das ist übrigens eine relativ neue Programmerweiterung. Früher mussten die Götter selbst in Menschengestalt in die Welt absteigen, um deren Output zu beobachten. Nachdem aber verschiedene unter ihnen, namentlich Zeus, durch ihr unprofessionelles Verhalten den Zweck des Experiments gefährdeten, wurde dieser Zugang abgeschafft.

Wie dem auch sei – wir können unterstellen, dass die Götter für das Programmieren und für den Ablauf des Programms keinen übermäßigen Aufwand treiben. Ein Computerspiel simuliert den Körper von Lara Croft auch nicht naturgetreu, sondern nur so genau wie nötig, um dem Betrachter eine glaubwürdige Illusion zu verschaffen. Gehen wir also davon aus, dass unsere Welt eine Vereinfachung der echten ist. Die *theory of everything*, nach der unsere Physiker so unermüdlich suchen, steht schon in der ersten Entwurfsskizze für das Programm unserer Welt, und ein paar Götter schauen grinsend zu, ob wir denn endlich dahinter kommen. Sie ist so wundervoll einfach, weil die göttlichen Programmierer keine Lust hatten, die Welt komplizierter zu gestalten als unbedingt erforderlich.

Dadurch werden einige Merkwürdigkeiten unserer Welt auf einmal verständ- ▷

Kleine Reparatur bei laufender Simulation? Das wäre für die Simulanten zwar machbar, würde aber bei den Simulierten kaum unbemerkt bleiben.



CORBIS

NACHGEHAKT

Der Tod des Experten und der Glaubwürdigkeit

Der Biowaffenexperte David Kelly ist nicht das einzige Opfer der Politik.

Politik und Naturwissenschaft passen nur selten zusammen. Erstere ist die Kunst, Kompromisse zu schließen (wohlwollend definiert) beziehungsweise das Ausüben von Macht und die Durchsetzung von Interessen (was der Realität näher kommen dürfte). Naturwissenschaft hingegen ist wertfrei und lässt wenig Raum für ideologische Interpretationen (in der Regel zumindest). Wie stark der Spannungsbogen zwischen beiden ist, wissen wohl am besten Wissenschaftler zu bestätigen, die sich in dem nervenaufreibenden Geschäft der Politikberatung versucht haben.

Wie zermürbend und undankbar dieses Geschäft manchmal sein kann, hat David Kelly deutlich erfahren müssen. Der Molekularbiologe und Biowaffenexperte hielt den Druck nicht mehr aus, der im Zuge des Streits um die Glaubwürdigkeit des britischen Dossiers über die irakischen Massenvernichtungswaffen auf ihn ausgeübt wurde. Von verschiedenen Stellen des Regierungsapparats mit massiven Vorwürfen konfrontiert, entfloh er diesem Albtraum in den Freitod.

David Kelly war ein zurückhaltender, bedacht agierender Wissenschaftler, der dennoch äußerst zielstrebig und unnachgiebig sein konnte. Unter seiner Ägide wandelte sich das frühere Waffenlabor im englischen Porton Down zu einem Forschungszentrum zur Biowaffenabwehr. Ab August 1991 leitete er mehrere Biowaffen-Inspektionen, welche die United Nations Special Commission (UNSCOM) im Irak durchführte.

Kellys Team konnte damals herausfinden, dass der Irak Unmengen von Nährmedien für Bakterien importiert hatte, die unzweifelhaft auf ein biologisches Waffenprogramm hinwiesen. Kellys Wissen und seine intensiven, gleichwohl sorgsamen Befragungen irakischer Wissenschaftler und Techniker zwangen den Irak schließlich dazu, das Vorhandensein eines Biowaffenprogramms zuzugeben. Die gleiche Sorgsamkeit und respektvolle Behandlung wurde Kelly von seinen eigenen Landsleuten offenbar nicht zuteil.

Der Umgang mit dem Biowaffenexperten durch die Regierung wirft zusätzliche Fragen an die Akteure auf, die einen Regimewechsel im Irak militärisch erzwingen wollten (und erzwungen haben). Zur Legitimation des Militäreinsatzes wurde tief in die Trickkiste der so genannten Spin Doctors gegriffen, die Berichte schöpferisch gestalten, um die öffentliche Meinung in ihrem Sinne zu beeinflussen. Fundierte Kritik von wissenschaftlichen Experten passte da nicht ins politische Kalkül.

Zu der ungelösten Frage, wie Massenvernichtungswaffen, die gar nicht existieren, innerhalb von 45 Minuten einsatzbereit gemacht werden können (wie das Dossier behauptete), gesellten sich weitere Merkwürdigkeiten. Etwa, warum der US-Präsident George W. Bush zu der – nachweislich falschen – Behauptung griff, der Irak habe sich im Niger mit Atomwaffenmaterial eindecken wollen.

Auch die Geheimdienstinformationen, die US-Außenminister Colin Powell dem UN-Sicherheitsrat präsentierte, um die Bedrohung durch den Irak zu belegen, entpuppten sich als wertlos beziehungsweise irreführend. In den vermeintlichen Waffendepots konnten US-Spezialeinheiten keine Spur von Massenvernichtungswaffen finden. Verdächtige Lastwagen – von den Geheimdiensten als mobile Labore zur Herstellung von Biowaffen eingestuft – erwiesen sich als Fahrzeuge zur Produktion von Wasserstoff, mit dem Wetterballons befüllt wurden.

Stellt sich hier angesichts der Arroganz und Glaubwürdigkeitskrise der Politiker nicht die Frage, ob wissenschaftliche Experten überhaupt noch mit ihnen zusammenarbeiten sollten?

Uwe Reichert

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

▷ lich. Warum ist die Lichtgeschwindigkeit beschränkt? Zum Zwecke der Vereinfachung! In der Götterwelt gibt es keine Grenzgeschwindigkeit. Reisen zu anderen Planeten sind kein Problem, jedenfalls kein zeitliches. Wenn eine Fliege irgendwo im Weltall zu husten beschließt, hat das unverzüglich Wirkungen auf die gesamte Götterwelt, weswegen diese stets für Überraschungen gut ist. Aber das in einer Simulation zu programmieren? Aussichtslos! Wie Stephen Wolfram in seinem heftig diskutierten Buch »A New Kind of Science« erklärt, ist die ganze Welt ein zellulärer Automat. Dessen Verhalten kann man mit erträglichem Aufwand berechnen lassen. Aber wenn jeder Ortspunkt zu jedem Zeitpunkt von jedem anderen Ortspunkt Informationen empfangen und verarbeiten müsste, würde das selbst göttliche Computer überfordern.

Die ganze Quantenmechanik ist auch nur so ein Programmiertrick. Hinter der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation lässt sich trefflich verbergen, dass die Götter unsere Welt nur mit beschränkter Genauigkeit repräsentieren. Wie sollte es auch anders gehen? Eine unvereinfachte Darstellung der Welt – irgendeiner Welt – könnte aus prinzipiellen Gründen nicht kleiner sein und auch nicht schneller ablaufen als die Welt selbst. So aber hält unser Weltcomputer für Ort und Impuls jedes Elementarteilchens zusammen nur eine beschränkte Anzahl von Speicherplätzen (Dezimalstellen) bereit. Muss die eine Größe sehr genau dargestellt werden, bleibt für die andere entsprechend weniger Speicherplatz übrig. Fehlende Dezimalstellen werden bei Bedarf mit dem Zufallszahlengenerator aufgefüllt. Gott würfelt nicht? Er lässt würfeln!

Der britische Mathematiker und Kosmologe John D. Barrow hat in einem kürzlich erschienenen Buch diesen Gedanken noch weitergetrieben (»The Constants of Nature. From Alpha to Omega«, Jonathan Cape 2002, siehe auch seinen Artikel in »New Scientist«, 7. Juni 2003, S. 44). Wie jedes große Programm ist auch dasjenige, das den Lauf unserer Welt berechnet, nicht fehlerfrei. Was tun die Götter, wenn sie feststellen, dass wegen zu knappen Speicherplatzes die Liste der Sterne überläuft und daher entgegen den Gesetzen unserer Physik viele Materieansammlungen nicht leuchten, sondern als Kalte Dunkle Materie in den Tiefen des Alls dahinvegetieren? Sie korrigieren den

Programmcode und lassen ab sofort »Welt 5.0« statt »Welt 4.7« ablaufen. Aber sie machen sich nicht die Mühe, die Welt von vorne zu starten. Der Fehler ist ja erst vor kurzem aufgetreten und hatte noch keine dramatischen Auswirkungen.

Wir dagegen würden unerklärlicherweise die Lichter am Himmel angehen sehen – zeitlich gestaffelt natürlich, die Lichtgeschwindigkeit bleibt ja beschränkt. Ein solches Ereignis würde uns einen handfesten Beweis dafür liefern, dass wir in einer künstlichen Welt leben. Es sei denn, der Unterschied zwischen heute und früher verschwindet in der üblichen Unschärfe aller kosmologischen Rekonstruktionen. Ist die inflationäre Frühphase des Universums ein hastig und etwas ungeschickt korrigierter Programmierfehler? Erklärt die Hypothese, die vorgeblichen Naturkonstanten seien doch variabel, die Beobachtungen besser als die Annahme eines systematischen Messfehlers? Gibt es die kleinen Variationen des kosmischen Mikrowellenhintergrundes erst, seit die Götter sie Hals über Kopf einprogrammiert haben, weil wir so intensiv danach suchten, dass wir andernfalls auf eine Unstimmigkeit in der Programmierung der Welt gesucht hätten?

Ignorabimus. Wir werden es nicht wissen. Es sei denn, der Output der Welt würde plötzlich nur noch aus der Zahl 42 bestehen. Wie wir von Douglas Adams (»Per Anhalter durch die Galaxis«) gelernt haben, ist das die endgültige Antwort auf die letzte Frage des Universums. Und im Gegensatz zu den Helden von Douglas Adams müssten wir noch nicht einmal wissen, was die Frage war.

Der Autor glaubt seit Jahren, er sei Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

SOZIALFORSCHUNG

Kein allgemeiner Werteverfall

An welchen Werten orientiert sich die Weltbevölkerung? Die Deutschen erweisen sich als gelassen: Abweichende Lebensstile werden toleriert, doch Gesetzestreue gilt weiterhin als Tugend.

Von Susanne Dambeck

Ronald Inglehart, Politologe an der Universität von Michigan, machte während des Irakkriegs von sich reden, als er seinen Landsleuten erklärte, sie seien in puncto Werte innerhalb des Westens ein Ausreißer: »Die USA sind ein wirklich interessanter Sonderfall – bei den Themen Religiosität, Patriotismus und Tradition erreichen nur Polen und Indien ähnliche Werte.«

Diese provokante These leitet Inglehart aus einer soliden Datenbasis ab, den Ergebnissen des jüngsten World-Value-Surveys (WVS). In über 65 Staaten wurden darin mehr als tausend Bürger pro Land zu ihren Wertvorstellungen und politischen Überzeugungen befragt. Die Antworten, als Zahlen codiert und aggregiert, fasste der Werteforscher in einem einzigen Schaubild zusammen. Auf dieser »Welt-Werte-Karte« beschreibt die y-Achse den Grad der Säkularisierung einer Gesellschaft, also die Abkehr von religiösen Einstellungen und Institutionen. Die x-Achse steht für die Zustimmung in einer Bevölkerung zu so genannten Selbstentfaltungswerten. Unter diesem Sammelbegriff subsumiert Inglehart so verschiedene Einstellungen wie die Gleichstellung der Frauen, die Toleranz gegenüber Minderheiten und nichttraditionellen Lebensentwürfen sowie den Wunsch nach politischer Beteiligung (siehe Grafik auf Seite 92).

Auf diese Weise bilden sich regelrechte Wertefamilien: So weisen katholische Länder wie Spanien oder Italien weniger ausgeprägte Säkularisierungswerte auf als Staaten mit überwiegend protestantischer Bevölkerung. Die stärkste Religiosität findet man in den islamischen Ländern Afrikas sowie im katholisch geprägten Lateinamerika. In den früheren Sowjet-Republiken ist die Distanz zur Religion so groß wie in Schweden, Deutschland oder den Niederlanden. Die Zustimmung zu Selbstentfaltungswerten fällt jedoch gering aus – ein Erbe der Sowjet-Ideologie.

»Als Verstandesmensch habe ich die Bedeutung von Religion lange unterschätzt«, gesteht Inglehart. »Mittlerweile weiß ich, dass der kulturelle Hintergrund einer Gesellschaft diese nachhaltig prägt, auch wenn sie sich inzwischen von dieser Religion weitgehend abgewendet hat.« Die sozialistische Ideologie wirke hierbei wie eine eigene Religion.

Aus diesem Grund wurden die Deutschen in den alten und neuen Bundesländern getrennt befragt. Das Meinungsforschungsinstitut Infas übernahm dabei die praktische Durchführung, die wissenschaftliche Auswertung teilten sich Forscher des Berliner Wissenschaftszentrums und des Kölner Zentralarchivs für Empirische Sozialforschung.

Religion ist Privatangelegenheit

Für Deutschland fallen vor allem die Unterschiede beim Thema Religion auf: Über 54 Prozent der ostdeutschen Befragten gaben an, weder an Gott noch an irgendeine andere spirituelle Kraft zu glauben. Dagegen glauben rund 73 Prozent der Westdeutschen an ein höheres Wesen. An der Spitze liegen hier die katholischen Länder Polen, Portugal und Malta mit Werten um 95 Prozent.

»In Deutschland geht der Trend weiterhin in Richtung Säkularisierung«, so der am WVS-Projekt beteiligte Kölner Sozialforscher Wolfgang Jagodzinski. »Auch wenn es Hinweise gibt, dass sich einige junge Menschen verstärkt für die Kirche interessieren, wäre es viel zu früh, hier von einer Trendwende zu sprechen.«

Doch nicht nur die Religion beeinflusst den Punkt eines Landes auf der Welt-Werte-Karte; auch die Ökonomie ist wichtig. Mit einigen wirtschaftlichen Grunddaten wie dem Bruttoinlandsprodukt und der Inflations- und Arbeitslosenrate können sogar Vorhersagen für Länder abgeleitet werden, in denen nie zuvor ähnliche Umfragen durchgeführt wurden. Mit diesen Informationen kann ▷

▷ die Position eines Landes auf dieser Karte recht genau prognostiziert werden.

Für den Einfluss des Besitzes auf die Weltanschauungen fand Inglehart heraus: Ab einem Jahreseinkommen von etwa 10 000 US-Dollar entkoppeln sich Einkommen und Zufriedenheit; mehr Geld macht jenseits dieser Grenze nicht automatisch zufriedener.

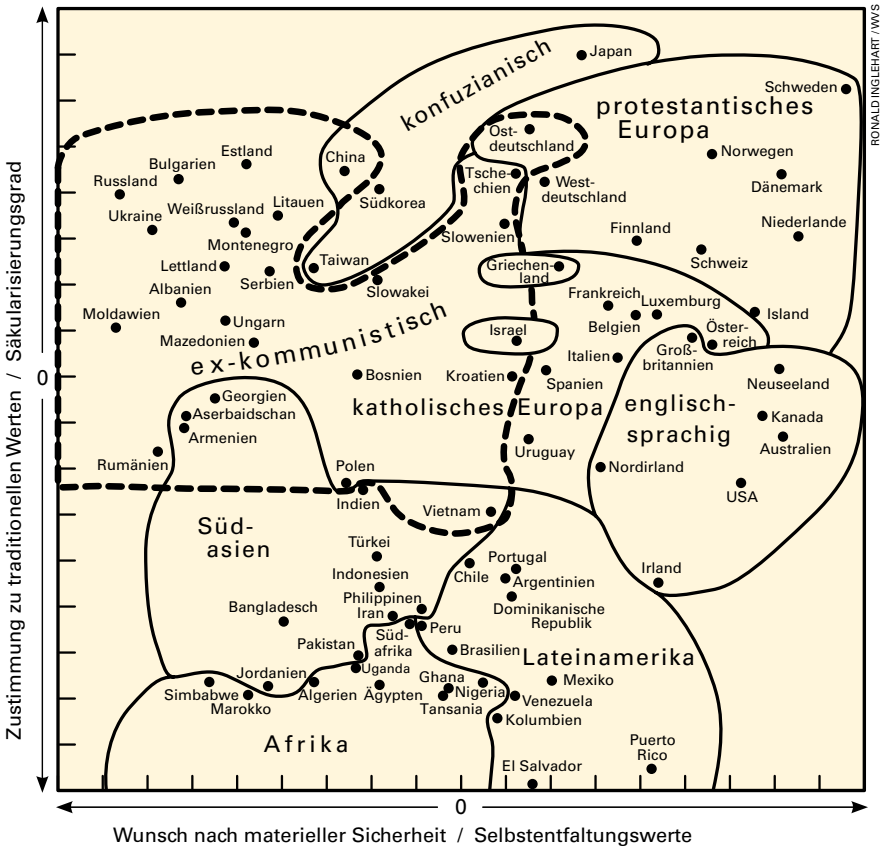
Dieses Ergebnis rückt die zweite Achse von Ingleharts Welt-Werte-Karte in den Blickpunkt: Hinter dem Konzept der Selbstentfaltungswerte verbirgt sich die erweiterte Postmaterialismus-Theorie des US-Forschers. Danach wird, wer unter schwierigen äußeren Bedingungen aufwuchs, in seinem weiteren Leben größeren Wert auf Besitz und Sicherheit legen. War die Kindheit jedoch von Überfluss geprägt, so werden die späteren Prioritäten über das rein Materielle hinausgehen. Nach dieser Theorie ist der Wohlstand in den westlichen Ländern nach dem Zweiten Weltkrieg dafür verantwortlich, dass sich die Wertmaßstäbe der Nachkriegsgeneration fundamental von denen ihrer Eltern oder Großeltern unterscheiden.

Die Kritik an dieser Theorie ist so alt wie das Konzept selbst. Trotzdem erlebte der »Postmaterialismus-Index« eine weite Verbreitung, denn damit konnten neue gesellschaftliche Konfliktlinien erklärt werden: Die Soziologie kannte bis dato nur den Gegensatz von Kapital und Arbeit, Konflikte zwischen verschiedenen Religionen, Konfessionen oder Ethnien sowie den Gegensatz zwischen Stadt und Land. Doch die Studentenbewegung sowie die Umwelt-, Friedens- und Frauenbewegungen blieben mit dem veralteten Theorieinstrumentarium unerklärlich.

Die Revolution wurde abgesagt

In den 1970er und frühen 1980er Jahren schien die neue Wertewandel-Theorie die politische Landschaft Westdeutschlands umfassend zu beschreiben: Die Zahl der »Postmaterialisten« in der Bevölkerung wuchs beständig, und der Umweltbewegung gelang in Gestalt der »Grünen« der Sprung in die Parlamente. Doch Ingleharts prognostizierte »Stille Revolution« blieb aus: Die Deutschen schwörten nicht mehrheitlich dem Materialismus ab.

Mit dem Ende des Kalten Krieges tauchten zudem neue politische Themen auf. Inglehart räumt ein, dass er nie beanspruchte, den Lauf der Geschichte vollständig erklären zu können: »Natürlich spielen auch einzelne Politiker eine große Rolle, aber in meinen Daten gibt es nun mal keinen Platz für einen Gorbatschow-Faktor.« Der Wahlforscher Hans-Dieter Klingemann vom Berliner Wissenschaftszentrum erklärt den breiteren Theorieansatz der Selbstentfaltungswerte mit der Ausdehnung der Umfrageforschung auf Osteuropa, Asien und die islamischen Länder. Denn das alte Postmaterialismus-Konzept galt ursprünglich nur für reiche westliche Gesellschaften.



RONALD INGLEHART / WVS

Die Welt-Werte-Karte stellt die Einstellungen der Weltbevölkerung dar. Die zusammengefassten Antworten aller Befragten eines Landes ergeben die Position dieses Landes in der Grafik.

»Wenn man sich die aktuellen deutschen Daten anschaut«, so Klingemann, »dann sieht man eine Gesellschaft, die Themen wie Ehescheidung, Abtreibung oder Homosexualität relativ gelassen sieht und abweichende oder fremde Lebensstile weitgehend toleriert.« Deutschland liege mit seiner lässigen »privaten Moral« leicht über dem europäischen Mittel, nur Skandinavien und die Niederlande zeigen sich liberaler, in den meisten anderen Ländern herrsche eine deutlich striktere Familien- und Sexualmoral.

Dagegen legen die Deutschen mehr Wert auf eine strenge »bürgerliche Moral«: Hier zu Lande werden Schwarzfahren, Steuerhinterziehung, Korruption oder Sozialbetrug besonders kritisch bewertet. Jagodzinski räumt hierzu ein: »Natürlich besagt das noch nichts über das tatsächliche Verhalten der Menschen, doch meist schlagen sich Verhaltensänderungen früher oder später auch in Einstellungsänderungen nieder.« Europaweit werden bei der bürgerlichen Moral härtere Maßstäbe angelegt als bei der privaten Moral, von einem allgemeinen Werteverfall kann deshalb keine Rede sein. Jagodzinski: »Die Steuermoral ist gerade dort besonders hoch, wo die Menschen mit der Arbeit des politischen Systems zufrieden sind, wie zum Beispiel in Schweden.«

Hier ergeben die WVS-Daten für Deutschland ein ambivalentes Bild: Die Zustimmung der Deutschen zur Demokratie als Regierungsform erreicht zwar auch im WVS über 95 Prozent, doch die Arbeit der jeweiligen Bundesregierung gefällt in verschiedenen Studien nur einem Fünftel der Befragten. Hierzu Klingemann: »Die Zahlen belegen, dass die demokratischen Normen weiter hochgehalten und die Regierungen kritisch an ihnen gemessen werden!«

Susanne Dambeck ist freie Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

◁

REZENSIONEN

GEOLOGIE

Peter Rothe

Gesteine

Entstehung – Zerstörung – Umbildung

Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 2002. 192 Seiten, € 39,90

Geologische Prozesse haben sich zu allen Zeiten der Erdgeschichte in gleicher Weise abgespielt wie in der Gegenwart – das besagt das 1834 von dem schottischen Geologen Charles Lyell (1797–1875) formulierte »Aktualitätsprinzip«. Man muss also die heute ablaufenden geologischen Prozesse studieren, um deren wesentliches Produkt, die Gesteine, verstehen zu können. Dieser Leitlinie folgt auch Peter Rothe, Professor für Geologie an der Universität Mannheim, mit dem vorliegenden Buch.

Dieser angeschliffene Tropfstein zeigt Jahrringe, weil je nach Jahreszeit unterschiedlich viel Kalk aus der Lösung ausgefallen ist.

Das erste Kapitel befasst sich mit gesteinsbildenden Mineralen. Ihre systematische Einteilung beruht seit dem 19. Jahrhundert auf chemischen Prinzipien und wurde später durch strukturelle Merkmale ergänzt. Insgesamt gibt es neun Mineralklassen; Gold, Kupfer und Blei gehören in die Gruppe der Elemente, Steinsalz in jene der Halogenide.

Amüsant liest sich aus heutiger Sicht der heftige Meinungsstreit um den Ursprung der Gesteine zwischen Plutonisten (»aus dem Feuer«) und Neptunisten (»aus dem Wasser«) in den Anfangszeiten systematischer Geologie. Es ist erstaunlich, wie sehr eine starke akademische Lehrerpersönlichkeit, der Plutonist Abraham Gottlob Werner (1749–1817), den Fortschritt einer ganzen Disziplin beeinträchtigen konnte.

Im nächsten Kapitel geht Rothe ausführlich auf die drei großen Gesteinsgruppen ein: Magmatite entstehen aus erstarrter Lava an der Erdoberfläche (Vulkanite) oder in wenigen Kilometern Tiefe (Plutonite), Sedimentgesteine durch Ablagerung verwitterten und erodierten Materials; Metamorphite wie etwa Marmor bilden sich in großen Tiefen bei starkem Druck und hohen Temperaturen. Die knapp hundert Seiten dieses Abschnitts gehen sehr ins Detail. Rothe bespricht verschiedene Klassifikationsschemata: für magmatische Gesteine nach dem Mischungsverhältnis der Bestandteile (das 1967 von Albert Streckeisen aufgestellte »Doppeldreieck«), für Sedimente nach der Korngröße und für Metamorphite nach Druck und Temperatur bei der Gesteinsbildung (das »Winkler-Diagramm«). Zwischen diesen harten Fakten erfährt man Historisches: Am 17. Juni 1989 feierte man in Südtirol die Entdeckung des Dolomits zweihundert Jahre zuvor. Damals war dem in Frankreich geborenen Malteser-Ritter Déodat Guy Sylvain Tancrède de Gratet de Dolomieu (1750–1801) ein dem Kalk ähnliches Gestein aufgefallen, das jedoch mit Säure nicht sofort »brauste«.

Besonderes Augenmerk legt Rothe auf den Granit, den bereits Goethe als »merkwürdige Steinart« bezeichnet hat. Nach wie vor bleiben zu seiner Entstehung viele Fragen offen: Ist er nun magmatisch oder sedimentär? Nach neueren Ergebnissen eher Letzteres, wenngleich die starre Schubladeneinteilung beim Granit an ihre Grenzen gerät.

Im abschließenden Kapitel »Geologische Grundlagen der Gesteinsbildung« nimmt Rothe den Leser mit auf eine theoretische Reise zum Mittelpunkt der Erde und erklärt ihm Näheres über die endogene – im Erdinneren stattfindende – Gesteinsbildung. Sobald dagegen Gesteine im Bereich der Erdoberfläche anstehen, unterliegen sie den Prozessen der Verwitterung. Mechanische Zerstörung führt zu klastischen Sedimenten, chemische Teilverwitterung führt zu Tonmineralen, und in den Verwitterungslösungen sammeln sich chemische Elemente, die später wieder in Form evaporitischer Minerale ausgefällt werden können. So entsteht der Erdboden, eine Mischung von Gesteins- und Mineralbruchstücken mit einer mehr oder weniger großen Menge zersetzter organischer Substanz.

Das gesamte Buch ist voll von Grafiken, die auch sehr komplexe Inhalte leicht verständlich machen. Daneben besticht das Werk durch zahlreiche Aufnahmen bizarrer Gesteinslandschaften, wie etwa der Sinterterrassen im Yellowstone-Nationalpark oder der Erdpyramiden am Ritten bei Bozen. Glossar und Register ermöglichen ein schnelles Nachschlagen von Fachbegriffen, und der Inhalt wird in zehn Jahren auch noch aktuell sein.

Gunther Jauk

Der Rezensent ist Diplomgeograf und Wissenschaftsjournalist in Graz.

Thermalsinterterrassen von Pamukkale (Türkei). Gelöster Kalk aus einer über dreißig Grad warmen Quelle scheidet sich bevorzugt an den Rändern ab, weil dort durch Turbulenz besonders viel CO_2 aus der Lösung entweicht.

PHYSIK

Thomas Görnitz und Brigitte Görnitz

Der kreative Kosmos

Geist und Materie aus Information

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2002. 408 Seiten, € 29,95

Die Quantentheorie ist die erfolgreichste naturwissenschaftliche Theorie. In keinem einzigen Fall sind ihre Vorhersagen bisher mit den experimentellen Ergebnissen in Widerspruch geraten, und mit enormer Genauigkeit beschreibt sie Phänomene im Bereich der Elementarteilchen, Atome und Moleküle, aber auch im makroskopischen Bereich. Kann diese Theorie auch einen Beitrag zur Erklärung des menschlichen Geistes liefern?

Bisher sind derartige Theorien eher als Kuriositäten einzustufen. Die prominenteste stammt von Roger Penrose: Bewusstsein entstehe in den das Gehirn durchziehenden »Mikrotubuli« durch bestimmte informationsverarbeitende Prozesse, die der Auswertung »nicht berechenbarer Funktionen« im Sinne der Mathematik entsprechen und daher für Computer prinzipiell nicht durchführbar sind (siehe die Rezension in Spektrum der Wissenschaft 8/1996, S. 118). Dazu postuliert Penrose eine erweiterte Theorie, in der im Gegensatz zur heutigen Form der Zufall keine Rolle mehr spielt und die auch die seit langem gesuchte Quantentheorie der Gravitation umfasst. Nur dem Ruhm des genialen Wissenschaftlers und Autors Penrose dürfte es zu verdanken sein, dass diese Theorie überhaupt ernsthaft diskutiert wird.

»Gedanken sind so real wie Atome«

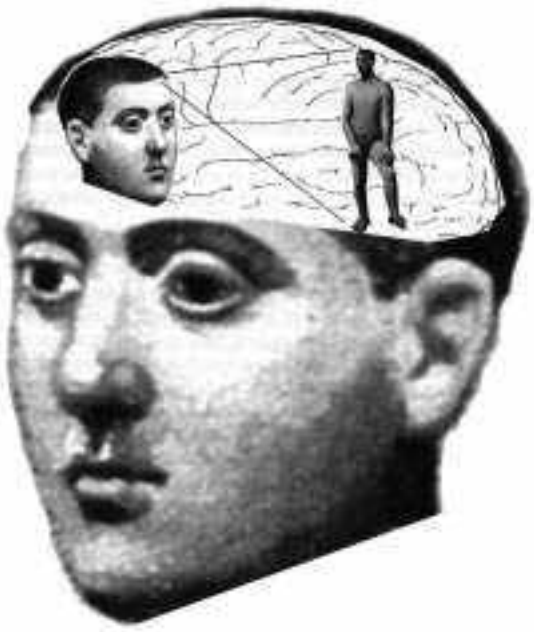
Dagegen müssen Thomas Görnitz, Professor für Didaktik der Physik in Frankfurt am Main, und Brigitte Görnitz, Psychotherapeutin und Dozentin in der Erwachsenenbildung, keinen Ruhm zu Hilfe nehmen, sondern können sich ganz auf die Kraft ihrer Argumente verlassen. Ihre grundlegende Annahme ist: Die allem Sein zu Grunde liegende »Substanz« ist »Information«; sie unterliegt den Gesetzen der Quantentheorie. Fundamental sind demnach nicht bestimmte materielle Einheiten wie etwa Elementarteilchen, sondern das, was unterschieden werden kann. Insbesondere sind geistige Zustände und Materie nur zwei Erscheinungsformen derselben Ur-Sache: »Die Gedanken sind so real wie die Atome«, lautet einer der Kernsätze des Buches.

Information wird hier zunächst in ihrem alltäglichen Sinne verstanden: Sie ist »etwas, von dem es nicht prinzipiell unmöglich erscheint, dass es gewusst werden könnte«, und ist nur denkbar zusammen mit einem Begriff oder einer Struktur, deren Bestimmung sie dient. In der einfachsten Form geschieht dies durch Ja-Nein-Entscheidungen, die im Computer durch Bits dargestellt werden. Diese »klassische« Information beruht auf Fakten, ist also das Ergebnis tatsächlicher Ereignisse und wird durch die klassische Physik beschrieben. Nun ist es notwendig, in einigen Bereichen der Natur von der klassischen Physik zur Quantentheorie überzugehen. Dem entspricht ein Übergang zur »Quanteninformation«, welche die zukünftigen Möglichkeiten von Quantenobjekten beschreibt. Eine dieser Möglichkeiten wird zufällig durch ein irreversibles Ereignis, zum Beispiel eine Messung, zu einem Faktum, also zu klassischer Information.

Die Autoren betonen, dass weder die klassische Information noch die Quanteninformation allein eine vollständige Beschreibung der Wirklichkeit liefern können. Nötig sei vielmehr das »gegenseitige Bedingen und Auseinander-Hervorgehen« von Fakten und Möglichkeiten, was sie als »Schichtenstruktur von klassischer Physik und Quantenphysik« bezeichnen. Da die Autoren von der Universalität der Information ausgehen, vermuten sie genau diese Schichtenstruktur auch als Grundlage der Informationsverarbeitung im Gehirn. Entscheidend sei nicht der Unterschied zwischen dem Unbewussten und dem Bewussten, die beide nur eine Form von Information seien, sondern zwischen der klassischen und der Quanteninformation.

Das Selbsterleben habe nun neben dem Zugang zu Fakten auch Zugang zu Quanteninformation: »Denkendes Selbsterleben bildet einen individuellen Quantenprozess, der in seinem Kern bis zum Tod des Lebewesens nicht klassisch wird.« Damit überschreiten die Autoren in einem wesentlichen Punkt das heutige Verständnis der Quantentheorie, demzufolge einem Beobachter der Zugang zur Quanteninformation stets versagt ist, da diese durch eine Messung stets zerstört wird.

Quanteninformation beschreibt alle zukünftigen Möglichkeiten eines bestimmten Quantenzustands zugleich, samt deren Veränderungen in der Zeit. Die Autoren sehen hierin eine Erklärung für die Assoziativität des Denkens und die »Nichtentschiedenheit« des Unbewussten. Aber gibt es in unserem Bewusstsein tatsächlich das gleichzeitige Erleben einander ausschließender Möglichkeiten? Dies scheint zunächst wenig plausibel, erleben wir unser Denken doch als grundsätzlich sequenziell, auch wenn wir rasch zwischen den verschiedensten Gegenständen wechseln und dabei mehrere Aspekte dieser Gegenstände im Auge behalten können. Aber auch wenn tiefergehende Introspektion gewisse Aspekte von Parallelität aufzeigen mag, droht hier doch die Schlussfolgerung, dass der Zugang zur Quanteninformation nur ein vermittelter ist, was die ursprüngliche Annahme in Frage stellen würde. Dies bedürfte umso mehr der Klärung, als die Autoren argumentieren, die enorme Geschwindigkeit des Gehirns bei der Lösung komplexer ▷



Selbstreflexion als Beobachtung des Bewusstseins durch einen Teil desselben, der wieder ein Bild des Ganzen misst

Aufgaben sei nur durch das gleichzeitige Durchdenken aller Möglichkeiten zu erklären: die einem Quantencomputer inhärente Parallelverarbeitung.

Durch die Bildung von neuen, räumlich ausgedehnten Quantenzuständen aus ursprünglich getrennten Zuständen könne schließlich zum einen das »Bindungsproblem« der Hirnforschung gelöst werden, wie nämlich Informationen über ein Objekt an unterschiedlichen Orten im Gehirn zusammengefasst und als Einheit erlebt werden können. Zum anderen enthielten solche kombinierten Quantenzustände die Antworten auf gänzlich neue »Fragen«. Diese Antworten könnten bei Feststellungen oder Entscheidungen zu Fakten werden, die in den Ausgangszuständen gar nicht enthalten waren. So könne im Rahmen der Quantenphysik tatsächlich Neues entstehen.

Wie der Titel andeutet, geht das Buch über die hier geschilderten Aspekte hinaus. Es verankert den universellen Informationsbegriff in der Kosmologie, nach dem Vorbild Carl Friedrich von Weizsäckers, dessen Ure in der heutigen Terminologie zu Quantenbits geworden sind, und zeichnet die Evolution der Information von der Strukturbildung in der Natur bis zur Schaffung von Bedeutung in Gehirnen nach. Gleichzeitig sucht es in den Arbeiten von Sigmund Freud und Carl Gustav Jung nach Analogien zur Quantentheorie, versucht etwa das »kollektive Unbewusste« Jungs mit der Quanteninformation im Unbewussten in Beziehung zu setzen.

Das Buch ist für einen breiten Leserkreis geschrieben und auch tatsächlich geeignet. Seine Stärke liegt darin, dass es aus einer tiefen Kenntnis der Quantentheorie heraus entstanden ist und deren Möglichkeiten konsequent weiterdenkt. Wenn man dabei auch nicht jedem Argument folgen oder jede Analogie für plausibel halten mag, so ist doch insgesamt ein konsistenter Rahmen geschaffen, der sogar experimentell – durch Introspektion – überprüft werden kann, noch bevor zukünftige Messmethoden Quantenzustände in Gehirnen nachweisen können. Eine wesentliche Frage wird dann sein, ob es im Gehirn makroskopisch ausgedehnte Quantenzustände gibt. Dies dürften viele Physiker bezweifeln. Die Autoren vermuten vor allem Photonen, also elektromagnetische Felder, als Träger von Quanteninformation.

Damit haben sich die Autoren nichts weniger vorgenommen als eine Lösung des notorischen Leib-Seele-Problems: Ist alles Denken Folge physiologischer Prozesse und wegen deren Determiniertheit die erlebte Freiheit des Geistes eine Illusion, oder muss man zu einem nicht-kausalen Dualismus zwischen Geist und Materie übergehen? Die meisten Naturwissenschaftler wählen die erste Alternative, einige wenige die zweite – und die Autoren eine dritte. Sie erklären die Information zur primären Substanz, räumen Gedanken und anderen erlebten Zuständen denselben Status ein wie materiellen Einheiten; die Kausalität bleibt erhalten, indem die Quantenmechanik zur grundlegenden Theorie der Information erhoben wird. Damit können nicht nur körperliche Zustände zur Ursache von Gedanken werden, sondern insbesondere auch Gedanken körperliche Zustände verursachen. Gibt es in diesem Rahmen eine Chance für die Freiheit des Denkens und Wollens? Die Autoren sehen sie in dem Wechselspiel von durch Fakten bestimmter Notwendigkeit und dem neue Möglichkeiten eröffnenden Zufall, wie es in der Schichtenstruktur von klassischer und Quantenphysik vorgeprägt sei.

Die Willensfreiheit zu beweisen ist nicht Sache der Naturwissenschaft

Diese Antwort vermag zwar noch nicht zu überzeugen. Vermutlich ist es aber auch gar nicht die Aufgabe der Naturwissenschaft, die Freiheit des Menschen zu erklären oder zu beweisen. Die Autoren sprechen deshalb auch nur von einem Rahmen, der Freiheit innerhalb einer naturwissenschaftlichen Weltbeschreibung zu denken erlaube. Die Schaffung dieses Rahmens, der mit der Lösung des Dilemmas zwischen Subjektivität und Kausalität zusammenhängt, ist die wesentliche Leistung dieses außergewöhnlichen Buches.

Sebastian Stier

Der Rezensent ist Physiker und promovierter Informatiker und arbeitet im Bereich Mobiltelefone bei der Siemens AG in München.

ABSURDES

Franz Krojer

Die Präzision der Präzession

Illigs mittelalterliche Phantomzeit aus astronomischer Sicht

Differenz, München 2003. Zu beziehen über das Internet: www.negation.info/differenz. 492 Seiten, € 26,–

Angeblich hat es die Jahre 614 bis 911 nie gegeben. Alles, was aus dieser Zeit überliefert ist, Karl den Großen und die Karolinger eingeschlossen, sei im hohen Mittelalter nachträglich aus verschiedenen Motiven und Gründen erfunden worden.

Ich habe von dieser Idee mehrfach gehört, aber nie ernsthaft darüber nachgedacht. Zu absurd schien mir die Vorstellung, irgendwelche finsteren Mächte hätten im hohen Mittelalter jeden aufgesucht, der Geschriebenes aufbewahrte, dessen Aufzeichnungen gewissenhaft und konsistent gefälscht – und dabei keinen einzigen übersehen! Nichtsdestotrotz hat die These von der »Phantomzeit« weite Kreise gezogen und lange Diskussionen ausgelöst.

Franz Krojer vom Institut für Informatik der Universität München hat es nun unternommen, sie mit astronomischen Mitteln zu widerlegen. Schließlich wären die antiken und die modernen Ortsbestimmungen von Planeten und Kometen nicht mit der Himmelsmechanik in Einklang zu bringen, wenn alle unsere Uhren und Kalender knapp 300 Jahre vorgehen würden. Die Widerlegung ist überraschend mühsam – die antiken Aufzeichnungen lassen viel Interpretationsfreiheit –, aber überzeugend.

Schön, dass jemand so sorgfältig mit dem Unfug aufräumt. Aber es bleibt das fassungslose Staunen, das auch durch die Wiedergabe der umfangreichen Polemik beider Seiten nicht nachlässt: Wie konnte sich dieser Unfug so weit verbreiten?

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

EXTREMSPORT

Peter Stark

Zwischen Leben und Tod

Extreme Erfahrungen, letzte Abenteuer

Aus dem Englischen von Cornelia Holfelder-von der Tann.
Rowohlt, Reinbek 2002. 349 Seiten, € 22,90

Extremsportler müssen mit einem inneren Widerspruch leben. Einerseits möchten sie jeden Spaß, den das Leben nur bieten kann, auch tatsächlich erleben, und unmittelbare Lebensgefahr bietet zweifellos einen sehr mächtigen Adrenalin-Kick. Andererseits ist die Gefahr – zum Beispiel beim Freihand-Klettern oder beim Wildwasserpaddeln – häufig realer, als ihnen lieb ist. Die meisten kennen Kollegen oder Freunde, die bei riskanten Rekordjagden ums Leben gekommen sind.

Peter Stark, selbst Abenteurer und Outdoor-Sportler sowie Journalist und Autor, untersucht in seinem Buch elf ungewöhnliche Arten, zu Tode zu kommen – grausam, Aufsehen erregend oder auch skurril. Jede Todesart bettet er in eine kleine Geschichte eines fiktiven Sportlers ein. So kann er seinem jeweiligen tragischen Helden noch bestimmte Charakterzüge und Umgehensweisen mit der unerwarteten Situation zuschreiben. Wie genau geht es vor sich, wenn jemand an einem Hitzschlag stirbt? Wie fühlt man sich, wenn man unter eine Lawine kommt? Was passiert beim Erfrieren? Was hat es mit der Taucherkrankheit, was mit der Höhenkrankheit auf sich?

Diesen Fragen geht der Autor äußerst detailliert nach, und bisweilen zielen die Geschichten so strebsam auf die physiologischen Erscheinungen rund um den Tod ab, dass die Charaktere und Handlungen arg konstruiert wirken. Dafür begnügt er sich aber auch nicht mit Allerweltsweisheiten, sondern geht mit wissenschaftlicher Genauigkeit an die Schilderung der letzten Momente heran.

Besonders gelungen ist ihm das bei der Beschreibung des Ertrinkens, aber es mutet schon sehr makaber an, wenn Stark dieser Todesart eine »besondere literarische Qualität« beimisst. Eine kurze Kostprobe: »54 Sekunden (noch 325 ml Sauerstoff): Während es wieder hinuntergeht, kämpft Matt mit dem Schaum in seiner Luftröhre. Sein Kehlkopf wird von einem Krampf befallen, schließt sich reflexartig vor dem Wasser und dem Schaum … Er hat das vage Gefühl, herumgerollt zu werden, als ob er in einem riesigen, warmen Whirlpool läge und dienstfertige Hände ihn massierten und bewegten.« Schade, dass lange nicht jedes Kapitel auf diese Art und Weise kurzweilig, informativ und ansprechend geschrieben ist!

Eindeutig negativ fällt auf, dass der Autor die auf dem Umschlag angekündigten »spirituellen Aspekte des Sterbens und die Sicht des Todes in anderen Kulturen« nur in ein paar Absätzen ziemlich oberflächlich streift.

Insgesamt handelt es sich aber um ein durchaus ansprechendes Sachbuch, dem die Ecken und Kanten nicht weggeschliffen worden sind. Zwar scheint es wie auf Extremsportler zugeschnitten, doch wer sich für die physiologischen Vorgänge in lebensbedrohlichen Situationen interessiert, liegt bei Peter Stark richtig. Nicht zuletzt soll das Buch dem Leser auch die Gefahren beim Extremsport verdeutlichen und so sein Leben schützen helfen.

Um nicht allzu viel vom Tod zu reden: Das Buch wird seinem Titel gerecht. Rund die Hälfte der Geschichten geht für die Protagonisten glimpflich ab. Sie kommen mit einem Schreck davon, den sie ihr Leben lang nicht vergessen werden.

Markus Mathys

Der Rezensent studiert interdisziplinäre Naturwissenschaften an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich.

KRYPTOLOGIE

Bengt Beckman

Codebreakers

Arne Beurling and the Swedish Crypto Program during World War II

Aus dem Schwedischen von Kjell-Ove Widman.
American Mathematical Society, Providence (RI) 2003. 259 Seiten, $ 39,–

Dieses Buch enthüllt eine der größten Leistungen der Kryptologie-Geschichte. Dass die Alliierten während des Zweiten Weltkriegs die deutsche Chiffriermaschine Enigma entziffert haben, ist seit 1975 bekannt (Spektrum der Wissenschaft 6/1999, S. 26). Dass aber auch die Schweden überragende Entzifferungserfolge hatten, ist bislang von der schwedischen Regierung geheim gehalten worden. Während bei den Alliierten ein großes, internationales Team den Erfolg errang, war es hier ein Mann allein: der geniale Mathematiker Arne Beurling. Das Buch beschreibt sein Leben und seine wichtigste Leistung, die Entzifferung der deutschen Chiffriermaschine »G-Schreiber«.

Die korrekte deutsche Bezeichnung ist »Siemens-Fernschreib-Geheimzusatz T-Typ 52«. Das Gerät verschlüsselte die aus dem Fernschreiber strömenden 5-Bit-Zeichen, indem sie diese zunächst zu den aus einem Quasi-Zufallsgenerator strömenden Bits nach der XOR-Regel (1+0=0+1=1, 1+1=0+0=0) addierte. Die Bits des so entstandenen Zeichens wurden dann – ebenfalls nach Maßgabe des Quasi-Zufallsgenerators – permutiert, das heißt in ihrer Reihenfolge vertauscht. Dieser Generator war ein Stiftradsystem aus zehn Rädern. Die Deutschen hielten die T-Typ 52 für sicher, und das mit einem gewissen Recht, denn schon die Periode des Schlüsselgenerators betrug etwa 10^{18}, die Gesamtzahl der möglichen Schlüsseleinstellungen sogar mehr als 10^{220}.

Beurling kannte diese Einzelheiten nicht. Zu Beginn des Krieges war der Fernschreiber, und erst recht die Fernschreib-Verschlüsselung, in Schweden noch weitgehend unbekannt. Schließlich handelt es sich um eine typisch deutsche (sprich Siemens-)Entwicklung. Aber Beurling hatte, wie er schrieb, mächtige Verbündete, nämlich die Deutschen selbst. Erstens sendeten die Operatoren, weil sie im Umgang mit dem neuen Medium noch zu ungeschickt waren, fast ausnahmslos Fernsprüche mit stereotypen Anfängen. Zweitens lief der Fernmeldeverkehr zwischen Deutschland und Norwegen durch schwedische Kabel, so-

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

Ulla Steuernagel, Ulrich Janßen
Die Kinder-Uni
Forscher erklären die Rätsel der Welt
dva, Stuttgart 2003, 200 Seiten, € 19,90

Wieso, weshalb, warum – wer nicht fragt, bleibt dumm!« Dieses Motto ist Kindern ein Begriff. Dass Wissen nicht nur im Fernsehen, sondern auch in einem Universitätshörsaal kindgerecht vermittelt werden kann, hat das Projekt »Die Kinder-Uni« an der Universität Tübingen bewiesen. Mehr als 5000 Kinder im Alter zwischen sieben und zwölf Jahren zog es im letzten Jahr in den Hörsaal, um eine von acht Vorlesungen zu verfolgen.

Die Initiatoren haben nun den »Mitschrieb« der Lehrveranstaltungen vom Sommer 2002 in Buchform zusammengestellt. Dieses Buch richtet sich aber nicht nur an Sechs- bis Zwölfjährige, sondern ist auch eine lesenswerte Lektüre für Eltern, Erzieher und Lehrer.

Aus der Rezension von Daniel Dreesmann

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Didaktik	■■■■■
Suchen/Finden	■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	22

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5

▷ dass die dortige Fernmeldeaufklärung eine riesige Zahl von Meldungen erfassen konnte. Schon erste Analysen erbrachten immer wieder Pakete von Geheimtexten, für die derselbe Schlüssel verwendet worden war.

Hätte sich die Verschlüsselung der T-Typ 52 auf die XOR-Addition beschränkt, so hätte bereits die geeignete Subtraktion zweier solcher schlüsselgleicher Geheimtexte wertvolle Aufschlüsse geliefert. Um jedoch auch die nachfolgende Substitution zu brechen, hätte man mindestens hundert Stück benötigt. Und ein so großes Paket kann auch in dem reichhaltigen Material der Schweden nur sehr selten vorgekommen sein.

Beurling stützte sich daher allein auf die Auswertung der stereotypen Anfänge von schlüsselgleichen Sprüchen. Durch Vergleiche, Subtraktionen, erneute Vergleiche und Zuordnungen gelang der Durchbruch – eine Meisterleistung der Kryptologie, die mit der Lösung der Enigma auf einer Stufe steht. Die genaue Beschreibung dieser Entzifferung in diesem Buch gehört zum Interessantesten, was je über Kryptologie veröffentlicht worden ist.

Nach dem großen Erfolg blieb immer noch die beträchtliche Arbeit, aus der großen Zahl der täglich eingehenden Meldungen die Klartexte zu gewinnen. Die Alliierten hatten für die entsprechende Aufgabe – mit dem Lorenz S-Zusatz SZ 40/42 anstelle der T-Typ 52 – eigens ein wahrhaft kolossales Gerät namens Colossus gebaut, das als der erste Computer der Geschichte gilt. Den Schweden

Beurling führte fachliche Diskussionen mit den Fäusten

gelang ein Meisterstück, nämlich der Nachbau einer zur T-Typ 52 wirkungsgleichen Maschine, die eingehende Nachrichten automatisch entschlüsselte. Vierzig solcher Geräte befanden sich danach im Einsatz. Die Erfolge waren sensationell, im Jahre 1941 wurden nicht weniger als 41400 deutsche Meldungen entziffert! Wie ein offenes Buch lagen die Aktionen und Planungen der Wehrmacht und der Reichsregierung vor den Schweden. Der deutsche Angriff auf die Sowjetunion konnte mit genauem Datum vorhergesagt werden.

Der schwedischen Codebreaker-Behörde FRA *(Försvarsväsendets Radio Anstalt)* gelangen noch weitere große Erfolge, darunter die Entzifferung des überschlüsselten Codes der sowjetischen baltischen Flotte, für die schwedische Regierung eine Nachrichtenquelle von unschätzbarem Wert. Auch diese Leistung wird hier fachlich präzise beschrieben, und auch sie verdient höchste Anerkennung.

Bengt Beckman, der selbst viele Jahre lang Codebreaker war, belässt es nicht beim Fachlichen, sondern geht auch auf Persönliches ein, wodurch das Buch einen besonderen Charme erhält. Denn die Codebreaker, und insbesondere Beurling, sind keineswegs einfache Charaktere, sondern vielfach Exzentriker mit ausgeprägtem Selbstbewusstsein. Friedfertigkeit gehört nicht zu ihren Eigenschaften. Als ein Mitarbeiter einmal gefragt wurde, wer denn seine Feinde seien, erhielt der Fragende, der wohl als Antwort »die Deutschen« oder »die Russen« erwartet hatte, die verblüffende Antwort: »Alle hier auf diesem Flur!«

Beurling, immerhin Professor, und sein Freund Yves Gyldén, ein bekannter Fachbuchautor, hatten sich einmal über eine Fachfrage so zerstritten, dass sie den Raum verließen und die Diskussion mit den Fäusten fortsetzten. Noch tagelang, so wird berichtet, hätte einer der beiden Kampfhähne ein blaues Auge gehabt. Beurling selbst wurde schließlich so unleidlich, dass ihn seine Behörde entlassen musste. Er ging zurück zur Universität. Die Arbeit litt nicht darunter, denn einerseits wirkte er als Berater weiter mit, andererseits waren die von ihm angelernten Mitarbeiter nun so weit, dass sie selbstständig weiterarbeiten und später auch den veränderten G-Schreiber entziffern konnten.

Für den deutschen Leser bleibt nach der Lektüre ein bitterer Nachgeschmack. Nicht nur die alliierten Kryptologen mit ihren großen Möglichkeiten waren den deutschen weit überlegen, sondern auch die schwedischen mit den Ressourcen eines kleinen Landes. Bengt Beckman, meinem alten Bekannten, ist mit diesem Buch ein großer Wurf gelungen. Er hat nicht nur Arne Beurling, sondern auch sich selbst ein Denkmal damit gesetzt.

Otto Leiberich

Der Rezensent ist promovierter Mathematiker und ehemaliger Präsident des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik.

ARCHÄOLOGIE

Joachim Willeitner

Die ägyptischen Oasen

Städte, Gräber und Tempel in der Libyschen Wüste

Philipp von Zabern, Mainz 2003. 155 Seiten, € 41,–

Ganz wohl ist dem Autor nicht bei seinem Unterfangen, die Oasen in der Libyschen Wüste und ihre archäologischen Zeugnisse zu porträtieren. Denn er möchte sicher nicht, dass ein Massentourismus wie im Niltal diese Kleinode heimsucht. Indem er neugierig macht und Aufmerksamkeit weckt, hofft Joachim Willeitner aber, Kunsträubern das Leben schwerer zu machen, die derzeit von der abseitigen Lage der Oasen profitieren.

Mit viel Liebe und großer Sachkenntnis hat der Ägyptologe Fakten und Bildmaterial zusammengetragen; ein Großteil der Fotos stammt von ihm selbst. Willeitner erläutert die Geologie und Geografie des Oasengürtels. Er berichtet über die Historie und beschreibt die Tempel, Grabmäler und Festungen von Charga, Dachla, Farafra, Bahariya (mit El-Haiz), Wadi Natrun und Siwa.

Nach heutigem Kenntnisstand, der sich immer wieder durch neue Funde erweitert, führten die Oasen in der Wüste westlich des Nils zu Zeiten der Pharaonen wie der römischen Eroberer ein recht eigenständiges Leben. Sie waren wichtige Stützpunkte für Fernhandelsrouten und für die militärische Expansion beziehungsweise Absicherung der Grenzen. Darüber hinaus gediehen in den Oasen Wein und Getreide. Demzufolge konnte sich – wie die Grabstätten dokumentieren – mancher Wohlhabende dort einen Luxus leisten, der in den Städten des Niltals seinerzeit nur Hochrangigeren zustand.

Mumienmaske einer Frau aus Ain Manawir, dem antiken Kysis

Obwohl eher ein Fachbuch, lädt dieses Werk zum Schmökern ein. Das Format eignet sich nicht unbedingt für das leichte Handgepäck des Reisenden, doch wer ungewöhnliche Begegnungen mit der ägyptischen Geschichte sucht, wird hier viele Anregungen finden.

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft. ▷

Die unterirdische Haupthalle des Grabes des Würdenträgers Djed-Amun-iuef-Anch in Qaret Qasr Selim wird von vier Säulen getragen. In der Römerzeit sind die Scheintürnischen an den Wänden durchgebrochen und dahinter weitere Grabhöhlen angelegt worden.

▷ PHILOSOPHIE

Norbert Hoerster

Ethik des Embryonenschutzes

Ein rechtsphilosophischer Essay

Reclam, Stuttgart 2002. 136 Seiten, € 3,60

Hat ein Embryo ein Recht auf Leben? Ist seine Tötung der Tötung eines Neugeborenen oder der eines erwachsenen Menschen gleichzustellen? Fragen dieser Art werden gegenwärtig in der Öffentlichkeit lebhaft diskutiert. Sie werden relevant im Kontext der Abtreibungsproblematik, aber auch der Embryonenforschung und der Präimplantationsdiagnostik (PID), bei der ein im Reagenzglas gezeugter Embryo vor seiner Implantation auf Erbkrankheiten getestet und, falls er diesen »genetischen Test« nicht besteht, unter Umständen getötet wird. Es ist die Aufgabe der philosophischen Ethik, sich dieser Fragen anzunehmen und in vorurteilsloser Abwägung der Argumente Stellung zu beziehen. Norbert Hoerster, profilierter, aber wegen seiner Ansichten zu Fragen wie Abtreibung und Sterbehilfe auch umstrittener Rechtswissenschaftler und Philosoph, tut dies im vorliegenden Büchlein in vorbildlicher Weise.

Der Embryo sei ein Mensch, und seine Tötung verstoße gegen das Prinzip der Menschenwürde – so das wohl verbreitetste Argument für das Lebensrecht des Embryos. Der Begriff der Menschenwürde sei jedoch, so Hoerster, selbst »normativ aufgeladen«. Der Artikel des Grundgesetzes, der sie für unantastbar erklärt, drücke nichts weiter aus als eine moralische Einstellung. Die Berufung auf das Menschenwürdeprinzip begründe also nur eine moralische Einstellung mit einer anderen und sei daher inhaltsleer.

Zweifellos ist der Embryo in einem rein biologischen Sinne als Angehöriger der Gattung *Homo sapiens* ein Mensch. Aber wenn wir damit sein Lebensrecht begründen wollen, verwenden wir »Mensch« in einem mehr als biologischen, nämlich (auch) moralischen Sinne. Ob aber ein Embryo auch in diesem Sinne ein Mensch ist und ihm daher ein Lebensrecht zukommt, sei eine offene Frage, die wir nicht durch den Hinweis auf die biologischen Fakten als beantwortet ansehen können.

Eines aber scheint klar: Wenn wir dem Embryo ein Lebensrecht zusprechen, dann muss seine Tötung auch unter allen Umständen verboten sein und entsprechend mit Strafe bedroht werden. Vor diesem Hintergrund kritisiert Hoerster die geltende Abtreibungsregelung, die dem Embryo ein Lebensrecht zuzugestehen behauptet und gleichwohl eine Frühabtreibung nach erfolgtem Beratungsgespräch straffrei lässt, als doppelzüngig. Da nach der geltenden Beratungsregelung die Tötung des Embryos zwar als Unrecht bezeichnet, aber nicht als solches behandelt wird, sei es ein »reines Lippenbekenntnis«, wenn das Bundesverfassungsgericht das Lebensrecht des Embryos betone.

Hoersters eigene Begründung für das Menschenrecht auf Leben basiert auf der Annahme, dass auf einer fundamentalen

»Die Berufung auf das Prinzip der Menschenwürde ist inhaltsleer«

ethischen Ebene einzig das Überlebensinteresse eines Individuums als Grund für die Zuschreibung eines Lebensrechtes gelten kann. »Überlebensinteresse basiert auf einem (tatsächlichen oder mutmaßlichen) Wunsch eines Wesens W, der sich auf eine von W für die Zukunft erwartete Erfahrung bezieht … [Das] setzt offensichtlich voraus, dass W in der Lage ist, sich selbst überhaupt als im Zeitablauf identisch zu erfahren, … also über das verfügt, was wir als ein Ichbewusstsein bezeichnen können.« Da ein Embryo das nicht hat, ist ihm auch kein Lebensrecht zuzusprechen.

Ausführlich geht Hoerster auf mögliche Einwände gegen diese Position ein. Mit der Koppelung des Lebensrechts an das Überlebensinteresse sei keineswegs ausgeschlossen, dass wir – wenngleich eher aus pragmatischen als aus fundamentalethischen Gründen – auch Säuglingen ein Lebensrecht zuzusprechen haben. Obwohl ein Mensch erst einige Zeit nach der Geburt ein Überlebensinteresse entwickelt, plädiert Hoerster für die Festlegung der Geburt als Grenzlinie für die Zusprechung eines Lebensrechtes, da eine Grenze nach der Geburt fatale Folgen für den Lebensschutz von Kindern hätte. Auch besagt seine Position nicht, dass wir den Embryo beliebig behandeln könnten. Schädigungen des Embryos sind auch auf der Basis einer Interessenethik zu verwerfen, weil damit der Mensch, zu dem sich der Embryo entwickelt, geschädigt werden kann.

Zudem gesteht Hoerster dem Embryo einen schlichten Lebensschutz zu; der gilt nicht ihm als Individuum, sondern ergibt sich daraus, dass wir Leben an sich wertschätzen und daher auch gegenüber dem Embryo Schutzpflichten haben. Dieser Lebensschutz ist aber Gegenstand einer möglichen Abwägung mit anderen Interessen; daher scheint Hoerster die Tötung des Embryos sowohl im Falle der Abtreibung als auch im Rahmen der Embryonenforschung und der PID moralisch legitim und ein strafrechtliches Verbot dieser Praktiken nicht begründbar.

Hoersters Abhandlung, die sich nicht nur an ein akademisches Fachpublikum richtet, besticht durch Klarheit der Darstellung, begriffliche Präzision und argumentative Genauigkeit. Hoerster will seine Gegner nicht pauschal diskreditieren, sondern intellektuelle Redlichkeit und argumentative Disziplin einfordern. Wer seine Abhandlung gelesen hat, wird in vielen öffentlich vorgetragenen Argumenten – beider Seiten – kaum mehr als rhetorische Leerformeln erblicken können.

Das heißt nicht, dass man Hoerster inhaltlich in allen Punkten zustimmen müsste. Möglicherweise gibt es jenseits der von ihm erwogenen religiösen oder metaphysischen Begründungen Argumente für die Zusprechung eines Lebensrechtes an den Embryo. Zudem bedürfen einige der Argumente, mit denen er Einwände gegen seine Position abwehrt, weiterer Diskussion. Vor allem wäre zu fragen, ob er den Einwand entkräften kann, dass nach seiner Position schwer Geisteskranken oder Menschen mit gewissen Krankheiten am Lebensende das Lebensrecht abgesprochen werden müsste.

Aber unabhängig davon, ob man Hoersters Positionen teilt oder nicht: Wer sich nicht damit begnügen will, eigene Emotionen und Vorurteile zur Grundlage seines moralischen Urteils zu machen, wem an Argumenten und rationaler Problemdiskussion gelegen ist, dem ist Hoersters Buch nachdrücklich zu empfehlen.

Oliver Hallich

Der Rezensent ist wissenschaftlicher Assistent für Philosophie an der Universität Düsseldorf. ◁

ZOOLOGIE

Die virtuelle Arche Noah

In einer virtuellen Datenbank sollen alle bedrohten Tier- und Pflanzenarten in Bild und Ton verewigt werden – bevor sie endgültig von diesem Planeten verschwinden.

Von Pia Prasch

Es ist ein Wettlauf mit der Zeit. Jeden Tag sterben überall auf der Welt Tier- und Pflanzenarten aus, bevor sie wissenschaftlich beschrieben oder im Bild festgehalten werden können. Fotografien und Filme von seltenen Lebewesen verstauben in Archiven oder gehen ganz verloren. Die gemeinnützige britische Organisation Wildscreen Trust hat es sich deshalb zur Aufgabe gemacht, die Artenvielfalt der Erde in einer »virtuellen Arche Noah« zumindest digital ins dritte Jahrtausend zu retten.

Es geht nicht in erster Linie um wissenschaftliche Daten zum Verlauf des Aussterbens; derlei ist eher auf der Seite www.redlist.org der World Conservation Union zu finden. Vielmehr soll möglichst jede der 11 000 Tier- und Pflanzenarten, die auf der Roten Liste der bedrohten Arten stehen, mit mehreren Fotos und bis zu zehn Minuten Film- oder Tonmaterial im virtuellen Archiv www.arkive.org verewigt werden. Bis Ende dieses Jahres wollen die Autoren der von Hewlett-Packard unterstützten Website immerhin zu fast 500 Arten Material bereitstellen, zu finden über den englischen oder lateinischen Artnamen oder die alphabetische Gesamtliste.

Neben der einzigen bekannten Filmsequenz des mittlerweile ausgestorbenen tasmanischen Tigers, der eigentlich ein Beutelwolf ist, gibt es bereits jetzt einen balzenden Handfisch und andere beeindruckende Aufnahmen zu sehen. Zusätzlich zum Bildmaterial werden wichtige Informationen über Biologie, Verbreitung, Lebensraum und Gefährdung der jeweiligen Art angeboten.

Ein eigenes Kapitel über die bedrohte Tierwelt Großbritanniens befindet sich im Aufbau. Darüber hinaus informiert Wildscreen Trust in Zusammenarbeit mit der britischen Landwirtschafts- und Umweltbehörde DEFRA in einem Pilotprojekt über die stark bedrohte Tiergruppe der Korallen (www.arkive.org/coral/Coral/coral.html). Unter dem Menüpunkt »Identifying corals« hilft eine interaktive Anleitung bei der Bestimmung lebender Korallen oder ihrer Skelette.

Die Kinderversion www.planetarkive.org/navigation/sitemap.jsp der ARKive-Seite beantwortet einfache Fragen nach Nahrung, Größe und Nachwuchs eines Tieres kindgerecht mit vielen Bildern, sodass sich der Besuch des Archivs trotz der englischen Sprache auch für sieben- bis elfjährige deutsche Schüler lohnt. Allerdings ist die Seite inhaltlich noch lückenhaft und technisch weniger ausgereift als ihr Pendant für Erwachsene.

Unter http://www.arkiveeducation.org/navigation/sitemap.html@g11n.enc=UTF-8 werden Grundschullehrer und interessierte Eltern ergänzend zur Kinderseite mit Unterrichtsmaterialien und Projektideen versorgt. In einem Experiment können Schüler beispielsweise nachvollziehen, dass sich die Schnabelform eines Vogels im Lauf der Evolution an das bevorzugte Futter angepasst hat.

Alles in allem steckt viel Potenzial in der virtuellen Arche Noah von Wildscreen Trust. Bisher genügt sie ihrem Anspruch, eine zentrale digitale Bibliothek für alle bedrohte Arten zu sein, allerdings noch nicht.

IFA-BILDERTEAM / NHPA, MARTIN HARVEY

Der Gelbhaubenkakadu *Cacatua sulphurea* lebt in Indonesien und Ost-Timor.

BILL & PETER BOYLE / AUSCAPE INTERNATIONAL

Der Handfisch *Brachionichthys hirsutus* lebt ausschließlich vor Tasmanien und gehört zu den am stärksten bedrohten Meeresfischen der Welt.

Die Autorin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

ZOOLOGIE

Die virtuelle Arche Noah

In einer virtuellen Datenbank sollen alle bedrohten Tier- und Pflanzenarten in Bild und Ton verewigt werden – bevor sie endgültig von diesem Planeten verschwinden.

Von Pia Prasch

Es ist ein Wettlauf mit der Zeit. Jeden Tag sterben überall auf der Welt Tier- und Pflanzenarten aus, bevor sie wissenschaftlich beschrieben oder im Bild festgehalten werden können. Fotografien und Filme von seltenen Lebewesen verstauben in Archiven oder gehen ganz verloren. Die gemeinnützige britische Organisation Wildscreen Trust hat es sich deshalb zur Aufgabe gemacht, die Artenvielfalt der Erde in einer »virtuellen Arche Noah« zumindest digital ins nächste Jahrtausend zu retten.

Es geht nicht in erster Linie um wissenschaftliche Daten zum Verlauf des Aussterbens; derlei ist eher auf der Seite www.redlist.org der World Conservation Union zu finden. Vielmehr soll möglichst jede der 11 000 Tier- und Pflanzenarten, die auf der Roten Liste der bedrohten Arten stehen, mit mehreren Fotos und bis zu zehn Minuten Film- oder Tonmaterial im virtuellen Archiv www.arkive.org verewigt werden. Bis Ende dieses Jahres wollen die Autoren der von Hewlett-Packard unterstützten Website immerhin zu fast 500 Arten Material bereitstellen, zu finden über den englischen oder lateinischen Artnamen oder die alphabetische Gesamtliste.

Neben der einzigen bekannten Filmsequenz des mittlerweile ausgestorbenen tasmanischen Tigers, der eigentlich ein Beutelwolf ist, gibt es bereits jetzt einen balzenden Handfisch und andere beeindruckende Aufnahmen zu sehen. Zusätzlich zum Bildmaterial werden wichtige Informationen über Biologie, Verbreitung, Lebensraum und Gefährdung der jeweiligen Art angeboten.

Ein eigenes Kapitel über die bedrohte Tierwelt Großbritanniens befindet sich im Aufbau. Darüber hinaus informiert Wildscreen Trust in Zusammenarbeit mit der britischen Landwirtschafts- und Umweltbehörde DEFRA in einem Pilotprojekt über die stark bedrohte Tiergruppe der Korallen (www.arkive.org/coral/Coral/coral.html). Unter dem Menüpunkt »Identifying corals« hilft eine interaktive Anleitung bei der Bestimmung lebender Korallen oder ihrer Skelette.

Die Kinderversion www.planetarkive.org/navigation/sitemap.jsp der ARKive-Seite beantwortet einfache Fragen nach Nahrung, Größe und Nachwuchs eines Tieres kindgerecht mit vielen Bildern, sodass sich der Besuch des Archivs trotz der englischen Sprache auch für sieben- bis elfjährige deutsche Schüler lohnt. Allerdings ist die Seite inhaltlich noch lückenhaft und technisch weniger ausgereift als ihr Pendant für Erwachsene.

Unter http://www.arkiveeducation.org/navigation/sitemap.html@g11n.enc=UTF-8 werden Grundschullehrer und interessierte Eltern ergänzend zur Kinderseite mit Unterrichtsmaterialien und Projektideen versorgt. In einem Experiment können Schüler beispielsweise nachvollziehen, dass sich die Schnabelform eines Vogels im Lauf der Evolution an das bevorzugte Futter angepaßt hat.

Alles in allem steckt viel Potenzial in der virtuellen Arche Noah von Wildscreen Trust. Bisher genügt sie ihrem Anspruch, eine zentrale digitale Bibliothek für alle bedrohte Arten zu sein, allerdings noch nicht.

IFA-BILDERTEAM / NHPA, MARTIN HARVEY

Der Gelbhaubenkakadu *Cacatua sulphurea* lebt in Indonesien und Ost-Timor.

BILL & PETER BOYLE / AUSCAPE INTERNATIONAL

Der Handfisch *Brachionichthys hirsutus* lebt ausschließlich vor Tasmanien und gehört zu den am stärksten bedrohten Meeresfischen der Welt.

Die Autorin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

WISSEN ZAHLT SICH AUS

Spektrum-Jubiläumspreisrätsel

1978–2003: Seit 25 Jahren erscheint die Zeitschrift Spektrum der Wissenschaft. Die in diesem Vierteljahrhundert angehäufte Information wird es den Lesern der ersten Stunde erleichtern, auch das zweite unserer wissenschaftlichen Jubiläums-Kreuzworträtsel zu lösen. Wie beim September-Rätsel wird es sich allerdings nicht vermeiden lassen, andere Quellen zu Rate zu ziehen – und ein bisschen unkonventionell über die Grenzen einzelner Fachgebiete hinwegzudenken.

Wissen lohnt sich – in unserem dreiteiligen Jubiläumspreisrätsel erhöht es die Chancen auf einen Gewinn.
Tragen Sie in die Kästchen rechts unten die Buchstaben ein, die Sie unter der entsprechenden Nummer im Kreuzworträtsel auf Seite 105 gefunden haben. »22/« meint den rechten oberen Nachbarn des Feldes mit der Nummer 22. Das Lösungswort bezeichnet ein Thema, das unsere Zeitschrift in den letzten 25 Jahren immer wieder aufgegriffen hat.

Senden Sie das Lösungswort mit dem Stichwort »Jubiläumspreisrätsel Oktober« per Post, Fax oder E-Mail an Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Fax 06221-9126751, marketing@spektrum.com.

Einsendeschluss ist der 27.10.2003 (es gilt das Datum des Poststempels). Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Unter allen Einsendern der richtigen Lösung des Oktober-Rätsels verlosen wir:

▶ **Kairos – eine Uhr von Chronoswiss**
Die Uhr Kairos im Wert von 3100 € besitzt ein formvollendetes, bis 30 Meter Tiefe wasserdichtes Goldstahlgehäuse, das aus 19 Teilen von Hand montiert ist. Das Saphirglas im Boden gibt den Blick auf ein hochpräzises Automatikwerk mit kugelgelagertem Rotor frei. Zifferblatt mit Datumsanzeige.

▶ **Zwei Heronsringe**
Der Wasserdampf, der über zwei Düsen aus dem Inneren des Kessels strömt, bringt den handgefertigten Heronsring ordentlich in Schwung: Es kann eine Drehzahl von über 3500 U/min erreicht werden!

▶ **Erstausgabe Encyclopædia Britannica**
Die wohl berühmteste Enzyklopädie der Welt als Replik der Erstausgabe von 1768–71. Die drei Bände vermitteln das geballte Wissen der damaligen Zeit – sozusagen der Klassiker eines Klassikers!

▶ **Fünfzig Gyrotwister**
Trainieren Sie Ihre Arme und Handgelenke, indem Sie der durch den Rotor des Gyrotwisters erzeugten Fliehkraft entgegenhalten.

IHR LÖSUNGSWORT:

7	5	13	65	60	31	8	47	22/	24	37	14

WICHTIGE INFORMATION

Im November wird es noch ein drittes Preisrätsel geben, in dem ein Lösungswort gesucht wird. Und das Mitmachen lohnt sich doppelt. Denn neben den insgesamt drei Monatsziehungen gibt es noch eine Schlussverlosung. Dort haben alle diejenigen die Chance auf einen Zusatzgewinn, die uns die Gesamtlösung schicken. Unter allen Einsendern der richtigen Gesamtlösung verlosen wir:

▶ **Eine Kurzreise nach New York** mit Besuch von Scientific American (Flug und drei Übernachtungen für zwei Personen)

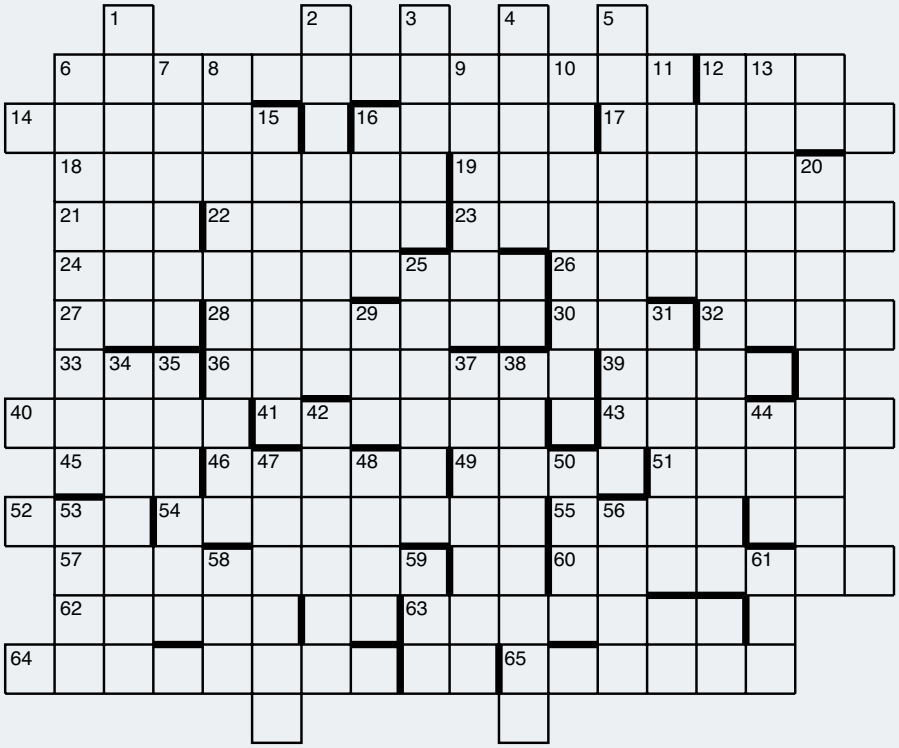
▶ **Eine Encyclopædia Britannica:**
Der Lexikonklassiker schlechthin: 32 Bände in überarbeiteter Neuauflage mit über 65000 Artikeln, mehr als 24000 Fotos, Karten und Illustrationen. Insgesamt 1,5 Buchmeter geballtes Wissen!

▶ **und fünfzig weitere Zusatzpreise ...**

Bewahren Sie die kompletten Lösungen von September bis November auf, aus ihnen ergibt sich die Gesamtlösung. Die Lösungen der drei Preisrätsel geben wir in der Januar-Ausgabe 2004 bekannt. Die Gewinner werden im Januar benachrichtigt.

Wissenschaftlich um die Ecke gedacht

Von Christoph Pöppe



Waagerecht:

6 das alte Federvieh ist mit der Zeit hart und trocken geworden
12 die Zahl der perfekten Harmonie – und des größten Chaos
14 beschrieb die Rollwürmer mit den Stielaugen
16 null Bock? no kids
17 Kettenbrüche, Algebra und Differenzialgleichungen waren seine Arbeitsgebiete
18 Lust liegt in der Luft
19 darum schwingt die Brücke, bis sie bricht
21 glasklar in der Jugend, fett im Alter
22 eine nichtlineare Reaktions-Diffusions-Gleichung erklärt seine Pigmentierung
23 gut gebrütet, ist es eins der schwersten
24 gleich geraten sie aneinander, und dann sind sie etwas ganz anderes
26 lässt die Evolution im Computer ablaufen
27 steht für 6 senkrecht (in der Archivversion)
28 seine Gesellschaft war die Gesellschaft der Gesellschaft der Gesellschaft
30 aromatisch und kraftvoll
32 vorschriftswidriger Speckbestandteil
33 ist nur wenige Nanometer breit und wird von einer junction überbrückt
36 haben Nerven wie Strickleitern
39 besitzanzeigendes Mittel des Hundes
40 der süße Dicke mit der kleinen Reynolds-Zahl
41 manch eine zeigt wilde Jagdszenen
43 steht in 19 waagerecht mit seinem Nachbarn eine Bahn weiter innen
45 sein Blau macht die sauren Lipide erkennbar
46 er legte axiomatisch fest, was als natürlich zu gelten hat
49 Insekten haben ein komplexes
51 hier sitzen die schweizerischen Technikspezialisten
52 nur die Diffusion steht dieser Zusammenballung im Wege (Abk.)
54 Standardeigenschaft des Genies
55 Statistiker greifen gerne hinein
57 ist bei uns zuständig für allerlei Getier (Vorname)
60 war lange Jahre Chef der kleinsten deutschen Synchronschwimmer (Nachname)
62 hier sitzen die französischen Rechenspezialisten
63 bei diesem kleinen Dicken gelang die Xenotransplantation vom Schwein – allerdings mit Hokuspokus (Nachname)
64 das größte unter den wappentauglichen Federviechern
65 wegen eines frühkindlichen Traumas ist bei ihm ein probates Stärkungsmittel kontraindiziert

Senkrecht:

1 die altmodischsten Verwandten
2 an ihrem Ende steht der neue Anfang
3 umhüllt den großen Nervenstrang (lat.)
4 die Alten schnitten ihn so gern
5 die lange schräge
6 wird von 27 waagerecht codiert
7 Metall-Ion im Käfig
8 erzwingt die richtige Umlaufsrichtung für die rote Flüssigkeit
9 duftet, bittert oder klebt – je nachdem
10 das liefert der Algorithmus am Ende
11 reagiert nicht, aber leuchtet auf Anregung
12 der nervt den nächsten Dendriten
13 Bergwohlverleih
15 Ist's Schüchternheit – oder Fußpilz?
16 sein Lemma hat nichts mit Erregung zu tun – eher mit dem Auswahlaxiom
20 groß, flach und salzig war sie, bevor sie eingesperrt und ausgetrocknet wurde
25 fand das Gesetz von den Partialdrücken
29 nicht hektisch die Erde umrundend, nicht am Firmament befestigt – ein Mittelding
31 ihre Form ist nicht oben spitz zulaufend, sondern flach – wie ein Hamburger
34 ihre Spinnerei half ein klassisches Optimierungsproblem zu lösen
35 das granulare Material, das 42 senkrecht bewegt
37 der neue Kleine mit der 64-Bit-Adressierung
38 ein Proton, ein Neutron – und sonst gar nichts
42 sie bringt 29 senkrecht an seinen Platz
44 sie definiert die Zeit in der Relativitätstheorie
47 auf ihn kommt es bei der Artenvielfalt an
48 wen schert's, ob der Barbier sich selbst rasiert? Man kann die Mengenlehre auch so betreiben
50 spröde ist dies Eisen
53 jeder Mensch ist es. In fast jedem Fachgebiet
56 das bestimmt unser Verhalten, sagen die Transaktionspsychologen (engl.)
58 verschließt 49 waagerecht
59 killt die Mücken und mehr
61 Austauschformat für Satelliten-Ortsdaten

Lösung zu »Pauls Kartentrick« (August 2003)

Paul zählt seine Karten in der Hand, subtrahiert davon 10 und die Kartenwerte der beiden aufgedeckten Karten und erhält den Wert der verdeckten Karte auf dem dritten Stapel.

Hermann Kuhr aus Braunschweig durchschaute Pauls Trick: h sei die Anzahl der Karten auf Pauls Hand, w_1 der Wert der ersten (aufgedeckten) Karte des ersten Stapels, w_2 der entsprechende Wert für den zweiten Stapel und x der noch unbekannte Wert für den dritten Stapel. Die Anzahl der Karten in jedem Stapel ist gleich 14 minus dem Wert der jeweils ersten Karte. Die Gesamtzahl 52 aller Karten ist nun gleich der Anzahl der Handkarten plus der Anzahl der Karten in den drei Stapeln:

$$52 = h + (14 - w_1) + (14 - w_2) + (14 - x)$$

Auflösen nach x ergibt $x = h - w_1 - w_2 - 10$.

Die Gewinner der fünf »Original Schweizer Taschenmesser« sind Günther Eisenreich, Leipzig; Gerd Lotze, Dresden; Günther Schellhorn, Wolfenbüttel; Rudolf Dörr, Schwabach; und Christian Reichetzeder, Pressbaum (Österreich).

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Kleine Drachen

Warum steigt ein Drachen in die Luft und bleibt dort oben stehen? Weil – über die Schnur – eine nach unten gerichtete Kraft auf ihn wirkt. Das gilt auch, wenn er nicht größer als ein Streichholz ist.

Von Wolfgang Bürger

Das Tokyo Kite Museum liegt laut Reiseführer nahe beim Hauptbahnhof der japanischen Hauptstadt. Aber selbst ein so prominentes Ziel war für uns, die wir nicht über Orts- und Sprachkenntnisse verfügten, nur sehr mühsam zu erreichen. Immerhin war die Schnellbahn so voll, dass Umfallen theoretisch gar nicht möglich war. Von der Endstation aus mussten wir uns nur noch einige hundert Meter zu Fuß durch die schnell fließenden Menschenströme bewegen, die das ruhelose Zentrum des Verkehrs in der Metropole ständig ansaugt und nach allen Himmelsrichtungen wieder ausspuckt, um an das heutige Ziel zu kommen: das Drachenmuseum von Tokio.

Beim Drachenmeister: Eigentlich hatten wir eine bedeutende Ausstellung historischer Flugdrachen erwartet, eine Dokumentation der viele Jahrhunderte alten Geschichte japanischen Drachenbaus. Aber was wir im Obergeschoss des unscheinbaren Hauses vorfanden, glich eher einer Werkstatt mit Verkaufsabteilung. Die Enttäuschung verwandelte sich alsbald in Freude, als wir Takeshi Nishibayashi vom Japan Create-A-Kite Club kennen lernten, der sich kurz »Nishi« nennen ließ. Ohne lange Vorrede gab er uns eine ganz praktische Einführung in die japanische Kunst des Drachenbaus und lud uns gleich für den nächsten Tag zum Start eines seiner Meisterschaftsdrachen in einen kleinen Park in seinem Bezirk Ogikubo ein. Es war ein glücklicher Zufall, der uns so rasch mit einem erfahrenen Meister der Drachenkunst zusammenführte. Japanische Flugdrachen, ihre Geschichte und Technik, das war (neben den wunderschönen japanischen Kreiselspielen) eines der zwei großen Themen, zu deren Studium ich, gemeinsam mit meiner Frau, auf Einladung der Japan Society for the Promotion of Science (J.S.P.S.) und als Gastprofessor am Tokyo Metropolitan Institute of Technology (T.M.I.T.) in Hino für drei Monate nach Japan gekommen war.

Da die sprachliche Verständigung über gebrochenes Englisch etwas mühsam war, verlegte sich Nishi auf die Praxis und zauberte mit großer Geschwindigkeit vor unseren Augen mit Lineal, Bleistift und Schere aus einem Bogen kräftigen Schreibpapiers und ein paar Streifen Tesafilm einen einfachen Bürodrachen (Kasten Seite 109). Ein zweites, viel dünneres Blatt Papier verwandelte sich, der Länge nach in Streifen geschnitten und mit Klebeband zusammengeklebt, in den doppelten Schwanz des Drachens, einige Meter fester Zwirn wurden zur Dra- ▷

FOTOS: CHRISTOPH PÖPPE

▲ Nach einer guten Viertelstunde Bauzeit ist der japanische Bürodrachen flugbereit.

▼ Der kleine Papierdrachen steht, durch seinen Schwanz stabilisiert, fast bewegungslos in der Luft (rechts). Ein Kreuz aus sehr dünnen Bambusstäben hält die Papierfläche in Form. Der künstlerisch ausgestaltete Drachen »Tsukizuro« (links) ist nur 14 Zentimeter breit.

FOTOSTUDIO MALL

FOTOSTUDIO MALL

Miniaturdrachen von Yuhji Kanno. Links »Yakko«, 5 Zentimeter breit; rechts oben der geringfügig kleinere »Sode«, darunter eine Miniaturausgabe von »Sode« mit ganzen 7 Millimetern Flügelspannweite.

▷ chenschnur. Bei schwachem Wind ist der Drachen gut flugfähig. Bis heute hüte ich ihn in meiner Sammlung von Funktionsspielzeugen.

Kleine Drachen brauchen Schwänze, die sie beruhigen und fast wie große Drachen fliegen lassen. Ohne Schwanz werden sie von den Turbulenzen der Luft geschüttelt und neigen dazu, in Luftwirbeln abzustürzen – selbst in den kleinen, die wir selbst durch Bewegungen unseres Körpers erzeugen.

Drachensteigen: Am Nachmittag des folgenden Tages führte uns Nishi von seinem Haus, den oben erwähnten Meisterschaftsdrachen von anderthalb Meter Flügelspannweite wie einen großen Vogel in der Hand und immer ein paar Schritte voraus, zu seinem bevorzugten ruhigen Drachen-Startplatz mitten in der belebten Stadt Tokio. Hinter dem von den hohen Wipfeln der Bäume gesäumten Rechteck war der blaue Himmel zu sehen, und vom Wind war unten auf dem Platz kaum etwas zu spüren. Wollte Nishi seinen Drachen wirklich hier und jetzt steigen lassen?

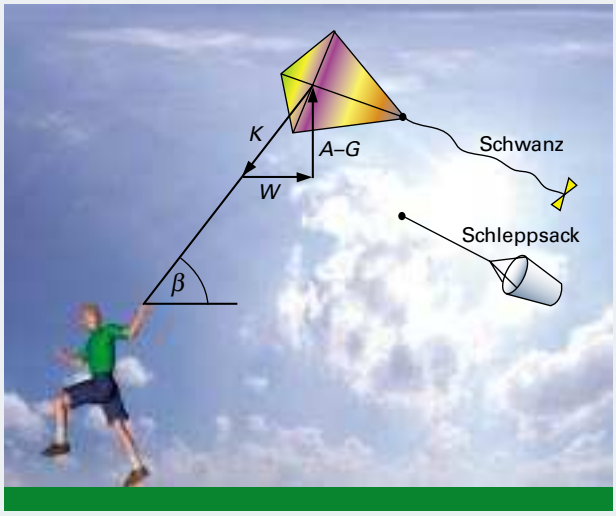
In der Tat! Es gelang ihm, den im Wettkampf erprobten Drachen, mit dem er bei einem internationalen Fest den »Preis für die steilste Drachenschnur« gewonnen hatte, durch das kleine Startfenster zu bringen und an den Himmel zu hängen. Dank einiger Fotos ist mir die Szene noch lebendig: Ohne einen Schritt zu gehen, manövrierte Nishi den Drachen durch vorsichtiges Freilassen und Wieder-Einziehen der Drachenschnur innerhalb dieses kleinen, durch seinen Standort und die Wipfel der Bäume vorgegebenen Raumwinkels und steuerte

Das Drachen-Paradoxon

An seine Schnur gefesselt schwebt ein Drachen im Wind. Der Überschuss $A - G$ des aerodynamischen Auftriebs A über sein Gewicht G gemeinsam mit dem aerodynamischen Widerstand W in Windrichtung spannt die Drachenschnur: Für die Schnurkraft K gilt $K = \sqrt{(A-G)^2 + W^2}$.

Würde der Drachen davonfliegen, wenn wir die Schnur losließen? Wohl kaum. Vielleicht würde er sich momentan aufbäumen, danach aber abstürzen, weil er schwerer als die Luft ist, die sein Volumen verdrängt. Um seinen Auftrieb A zu erzeugen, muss er ständig einen Teil des Windes, der auf ihn zukommt, nach unten leiten. Dazu braucht er die Hilfe der Vertikalkomponente $K \sin\beta$ der Schnurkraft K, die mit der Kraft $A - G$ im Gleichgewicht ist. Ohne den Zug an der Schnur nach unten ($K \sin\beta > 0$) kann ein Drachen nicht oben in der Luft schweben. Ist das nicht paradox?

Würde die Drachenschnur plötzlich losgelassen, wäre auch das vorher bestehende Gleichgewicht der Kräfte in der Horizontalrichtung aufgehoben, und der Wind würde den Drachen mit Macht fortblasen. Es ist nicht ohne weiteres vorhersagbar, wie er sich danach bewegen, ob er trudeln oder einen Gleitflug machen würde. Auf jeden Fall ginge er bald in Windrichtung zu Boden.

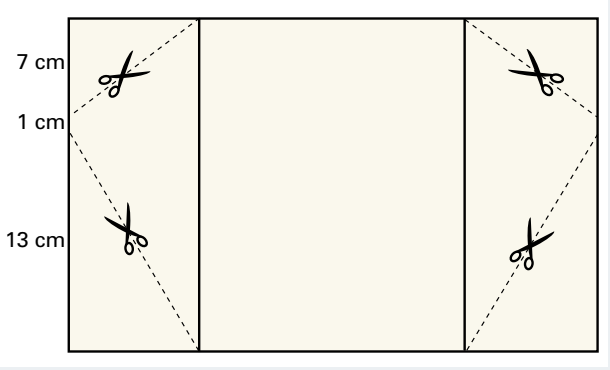


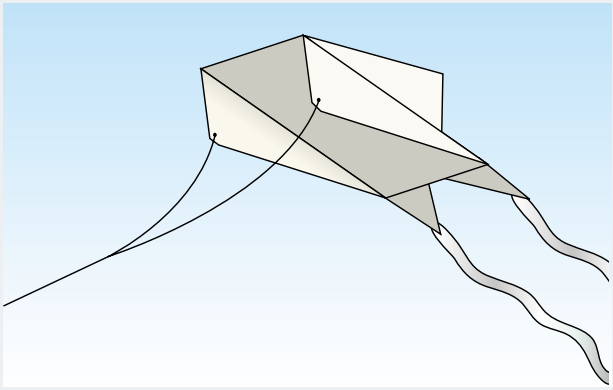
THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ein Schwanz (oder Schleppsack) macht den Drachen weniger empfindlich gegen Schwankungen des Windes. Je mehr der Schwanz zum Widerstand beiträgt, desto kleiner wird der Winkel β, den die Drachenschnur mit dem Boden bildet (desto flacher fliegt der Drachen).

Bauanleitung für den japanischen Bürodrachen

Falten Sie ein Stück steifes Papier (etwa 120 Gramm pro Quadratmeter) vom Format DIN A4 parallel zur kurzen Seite bei einem Viertel und drei Vierteln der langen Seite, sodass ein Mittelteil und zwei Seitenteile entstehen. Schneiden Sie von den Seitenteilen je ein kleines und ein großes Dreieck ab; damit bleibt von jedem Seitenteil ein Trapez mit einer sehr kurzen Seite stehen. Verstärken Sie diese kurzen Seiten mit Tesafilm, bohren Sie kleine Löcher hinein, knoten Sie Zwirnsfäden in diesen Löchern fest und vereinigen Sie beide (genau gleich langen) Fäden nach etwa 50 Zentimetern zur Drachenschnur.




THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die beiden Trapeze werden nach unten geklappt und dienen als »Bauchflossen« des Drachens. Die weggeschnittenen Dreiecke finden ebenfalls Verwendung: die beiden großen als »Rückenflossen«, mit der spitzeren Ecke voraus genau über die Bauchflossen beiderseits mit Tesafilm an den Körper des Drachens geklebt, die kleineren als (horizontale) »Schwanzflossen«, die den Körper nach hinten verlängern. An die Schwanzflossen kleben Sie je einen Schwanz, der seinerseits aus etwa 1,50 Meter langen Streifen dünnen Papiers besteht.

ihn souverän in die Windströmung über den Bäumen. Damit hatte er uns demonstriert, was ich schon in der einschlägigen Literatur gelesen, aber nicht geglaubt hatte: Auch bei sehr schwachem Wind, vielleicht sogar bei völliger Windstille, kann man Drachen von einem festen Standort aus steigen lassen.

Nach seiner eindrucksvollen Vorführung konnte Nishi die Haspel der Drachenschnur eine Zeit lang aus der Hand geben und uns überlassen. Vorübergehend bedurfte es weder tieferer Einsicht in die Gesetze der Aerodynamik noch besonderer Geschicklichkeit, um den Drachen höher und höher steigen zu lassen, bis er nur noch ein dunkler Punkt am Himmel war und das Auge die dünne Nylonschnur in der Höhe gar nicht mehr wahrnehmen konnte. Die in Deutschland zulässige Steighöhe von hundert Metern (soweit mir bekannt, mit Rücksicht auf den Flugverkehr) haben wir weit überschritten.

Am Ende der Vorstellung machte uns Nishi sogar seinen erfolgreichen Drachen zum Geschenk. Leider ereilte ihn in Deutschland später das klassische Schicksal: Im starken Herbstwind wurde er von einem hohen Baum gelöchert und ging bei dem Versuch, ihn zu bergen, gänzlich zu Bruch.

Ein Nachbau des Meisterwerks scheiterte daran, dass ein Bauplan in der Literatur nicht zu finden war. Immerhin erfuhr ich bei der Suche, dass Nishi auch eine Autorität für indische Kampfdrachen ist: In seinem »Fighter Kite Book« nennt David Gomberg sie schlicht »Nishi kites«. Beim Drachenkampf stehen die Spieler auf den Dächern ihrer Häuser und versuchen mit der glassplitterbesetzten Schnur ihres Drachens dem gegnerischen Drachen den Lebensfaden abzuschneiden. Kampfdrachen sind empfindliche Einleiner, die am Himmel nicht ruhig stehen. Beim Kreisen lassen sie sich steuern, wenn man im passenden Moment die Schnur lockert.

Miniaturdrachen: Um die traditionellen Handwerkskünste am Leben zu erhalten, sind in Japan zahlreiche Künstler als »lebende Denkmäler« berufen worden. Man kann ihnen in ihrer Werkstatt bei der Arbeit zuschauen, wo sie auch ihre Werke zu stolzen Preisen verkaufen. In der Künstler-Kolonie von Alt-Tokio hat unter Kreiselmachern, Korbflechtern und anderen Kunsthandwerkern auch Yuhji Kanno seine Werkstatt. Seine Spezialität sind dekorative Miniaturdrachen, die größten von den Ausmaßen eines Blattes und die kleinsten nicht größer als ein Streichholzkopf. Jeder Drachen ist mit einem kleinen Gemälde von Hand bedruckt, das Figuren aus der Dichtung, der Geschichte oder der Mythologie darstellt. Auch die kleinsten Miniaturdrachen, versichert Herr Kanno, können fliegen. Empfindlich wie sie gegen die geringsten Luftbewegungen sind, brauchen sie sämtlich einen Schwanz. Über die Geschichte der Miniaturdrachen weiß Herr Kanno zu berichten, dass gegen Ende der Feudalherrschaft die Leute von Edo, dem heutigen Tokio, hoch über den Ansiedlungen der verhassten Samurai-Krieger Yakko-Drachen steigen ließen, die einen Fußsoldaten der Feudalherren darstellten. In der Folge entwickelten sie sich zu Spielzeug-Drachen und zu Miniaturen als Glücksbringer für Schicksal, Ruhm, Glück und langes Leben. Kannos Drachen sind im Drachenmuseum von Tokio ausgestellt. ◁

Wolfgang Bürger ist emeritierter Professor für Theoretische Mechanik an der Universität Karlsruhe.

The Fighter Kite Book. Von David Gomberg. Cascade Kites, P. O. Box 13363, Salem Oregon 97309, 1992.

Fighter Kites. Von Philippe Gallot. St. Martin's Press, New York 1989.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

KENN BROWN

Das holografische Universum

Aus der Theorie Schwarzer Löcher folgern Forscher, dass das Universum einem gigantischen Hologramm ähneln könnte. Physikalischen Vorgänge, die wir im vertrauten dreidimensionalen Raum erleben, würden dann durch eine Art Film in zwei Dimensionen beschreibbar.

WEITERE THEMEN IM NOVEMBER

Kranke Retortenkinder – Bilanz nach 25 Jahren

Nach einer künstlichen Befruchtung weisen Kinder öfter als sonst Schäden auf. Haben Mediziner die neuen Methoden zu früh eingesetzt?

3-D-Einblicke in die Zellmaschinerie

Ein raffiniertes tomografisches Verfahren führt buchstäblich vor Augen, welch ein Gedränge in Zellen herrscht und wie die zahllosen Moleküle miteinander kooperieren.

Bodyguards des Körpers

Wie gelingt es unserem Immunsystem, harmlose und gefährliche Eindringlinge zu unterscheiden? Wie überstehen Viren wie HIV dennoch die Abwehr? Forscher haben in dieser Hinsicht viel dazugelernt.

AFB CORBIS

Schocks in Serie

Seismische Erschütterungen können an entfernten Bruchzonen zusätzliche Spannungen erzeugen und so dort ebenfalls Erdbeben auslösen. Diese neue Erkenntnis sollte die Bebenvorhersage verbessern helfen.

SONDERTEIL: Innovation in Deutschland

Zum 25-jährigen Jubiläum präsentiert Spektrum der Wissenschaft einen 32-seitigen redaktionellen Sonderteil rund um das Thema »Forschung und Entwicklung«. Themen sind unter anderem: chipbasierte Diagnostik-Geräte zur Krebs-Früherkennung, intelligente E-Mail-Agenten sowie Weltraumroboter made in Germany.